



**APOYO EN LA REALIZACIÓN DE ESTUDIOS DE CONEXIÓN MEDIANTE
SOFTWARE ESPECIALIZADO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS
Práctica empresarial en la modalidad de semestre de industria**

Andrés Mauricio Alzate Gutiérrez

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero Electricista

Asesor

Jesús María López Lezama, Doctor (PhD) en Ingeniería Eléctrica

Universidad de Antioquia

Juan Manuel Arboleda Fernández, Ingeniero Electricista

FLUX S.A.S.

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Eléctrica

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

- Referencia** [1] A. Alzate Gutiérrez, “Apoyo en la realización de estudios de conexión mediante software especializado y análisis de resultados”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2023.
- Estilo IEEE (2020)



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina

Jefe departamento: Noé Mesa Quintero

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
I. INTRODUCCIÓN	9
II. OBJETIVOS	10
III. MARCO TEÓRICO	11
IV. METODOLOGÍA	12
V. RESULTADOS	14
VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
VII. CONCLUSIONES	45
REFERENCIAS	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama unifilar de la zona de impacto.	14
Figura 2. Flujo de potencia 9 a.m.	15
Figura 3. Flujo de potencia 12 m.	16
Figura 4. Flujo de potencia 3 p.m.	16
Figura 5. Cortocircuito trifásico.	17
Figura 6. Cortocircuito monofásico.	18
Figura 7. Diagrama unifilar de la zona de impacto.	19
Figura 8. Modelo en software especializado.	19
Figura 9. Flujo de potencia 9 a.m.	20
Figura 10. Flujo de potencia 12 m.	21
Figura 11. Flujo de potencia 3 p.m.	21
Figura 12. Resultados cortocircuito trifásico	22
Figura 13. Resultados cortocircuito monofásico	23
Figura 14. Resultados coordinación cortocircuito trifásico.	24
Figura 15. Resultados coordinación cortocircuito trifásico.	24
Figura 16. Diagrama unifilar de la zona de impacto.	26
Figura 17. Caso Planta Solar FV OFF 2023.	26
Figura 18. Caso Planta Solar FV ON 2023.	27
Figura 19. Caso Planta Solar FV OFF 2030.	27
Figura 20. Caso Planta Solar FV ON 2030.	28
Figura 21. Resultados de cortocircuito trifásico.	29
Figura 22. Resultados de cortocircuito monofásico.	30
Figura 23. Coordinación falla monofásica baja tensión.	31
Figura 24. Coordinación falla trifásica baja tensión.	31

Figura 25. Subestación Cordialidad, ramal del circuito y punto de conexión.	32
Figura 26. Flujo de carga caso base proyecto solar OFF.	33
Figura 27. Flujo de carga caso base proyecto solar ON.....	33
Figura 28. Cortocircuito monofásico.	34
Figura 29. Cortocircuito trifásico.	35
Figura 30. Falla monofásica en baja tensión.	36
Figura 31. Falla trifásica en baja tensión.....	36
Figura 32. Falla monofásica en media tensión.	37
Figura 33. Falla trifásica en media tensión.	37
Figura 34. Falla monofásica en cabecera.	38
Figura 35. Falla trifásica en cabecera.....	38
Figura 36. Vista inversores del proyecto.....	40
Figura 37. Inversores en detalle.	40
Figura 38. Gabinetes en subestación y protecciones inversores.	41
Figura 39. Vista frontal gabinete protecciones inversores y barraje.	42
Figura 40. Espacio disponible para los nuevos equipos.....	42
Figura 41. Gabinetes en subestación celdas de protección y remonte.	43

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

AGPE	Autogeneración a Pequeña Escala
CNO	Centro Nacional de Operación
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
Ing.	Ingeniero
OR	Operador de Red
RETIE	Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas
SDL	Sistema de Distribución Local
SIN	Sistema Interconectado Nacional
STR	Sistema de Transmisión Regional
UdeA	Universidad de Antioquia
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética

RESUMEN

Este documento presenta el informe de práctica empresarial realizado en FLUX S.A.S., empresa dedicada a la realización de proyectos de ingeniería y otras actividades relacionadas de consultoría técnica. Estos proyectos se basan en los estudios de conexión simplificado y de generación a gran escala para conexión al SIN, STR o SDL, con enfoque en fuentes de energía renovables como la solar fotovoltaica o eólica. Los estudios de conexión de autogeneración o generación deben cumplir con la normativa vigente establecida por la UPME, el CNO, el RETIE, el IEEE y diferentes organismos competentes encargados de la seguridad, estabilidad y control de la red eléctrica colombiana, tanto para su expansión a futuro como para el control de la transmisión energética y el cumplimiento para la satisfacción de la demanda.

En esta empresa se realizaron diversos estudios de conexión simplificados de proyectos solares fotovoltaicos con software especializado DIgSILENT PowerFactory ubicados en diferentes ciudades del país, los estudios se orientaron al análisis de flujo de potencia, cortocircuito monofásico y trifásico, coordinación de protecciones para demostrar que la puesta en operación del proyecto no afecta en correcto funcionamiento del sistema de transmisión eléctrico. Además, se realizó la visita a proyectos solares instalados con la necesidad de la aprobación por parte del OR.

En este documento se presentan los objetivos, la metodología y algunos detalles de los resultados para los estudios realizados, cumpliendo con la confidencialidad de los datos de FLUX S.A.S. y de cada uno de los clientes.

***Palabras clave* — Estudios de conexión, Energía, Transmisión, DIgSILENT PowerFactory, Fuentes renovables, UPME, SIN.**

ABSTRACT

This document presents the internship report at FLUX S.A.S., a company dedicated to engineering design and other related technical consulting activities. These projects are based on simplified connection studies and large-scale generation for connection to the Colombian National Interconnected System (SIN), Regional Interconnected System (STR), or Local Distribution System (SDL), with a focus on renewable energy sources such as photovoltaic solar or wind power. The self-generation or generation connection studies must comply with the different current regulations established by the UPME, the CNO, the RETIE, the IEEE and different competent organizations in charge of the security, stability and control of the Colombian electrical network, both for its expansion in the future as well as for the control of the energy transmission and the fulfillment for the satisfaction of the demand.

In this company, various simplified connection studies of photovoltaic solar projects were carried out with specialized software DIgSILENT PowerFactory located in different cities of the country, the studies focused on power flow analysis, single-phase and three-phase short circuit, protection coordination to demonstrate that the project's operation does not affect the correct functioning of the electrical transmission system. In addition, visits were made to solar projects installed with the need for OR approval.

This document presents the objectives, methodology, and some details of the results for the studies carried out, complying with the confidentiality of data from FLUX S.A.S. and each of its clients.

***Keywords* — Connection studies, Energy, Transmission, DIgSILENT PowerFactory, Renewable sources, UPME, SIN.**

I. INTRODUCCIÓN

En general, es claro que la transición energética es un tema de amplio interés alrededor del mundo para disminuir o erradicar diferentes problemas como lo es el cambio climático. Se han realizado múltiples conferencias y acuerdos alrededor del mundo que están a favor de la transición energética como el acuerdo de París para cambiar las políticas y los métodos de generación convencionales en dirección hacia la generación por medio de energías renovables que garanticen la sostenibilidad del mercado energético para satisfacer la demanda y que, a su vez, disminuyan la huella de carbono [1]. Actualmente, en Colombia, existe una tendencia de energías amigables con el medio ambiente; sin embargo, es fundamental diversificar aún más la matriz energética debido a la alta dependencia de fuentes de energía hídricas y, en menor medida, fuentes provenientes de combustibles fósiles y gas (cuyas reservas son cada vez menores) para evitar algún tipo de racionamiento energético debido a cualquier inconveniente presentado en las fuentes de generación convencionales, es necesario implementar fuentes renovables con mayor capacidad y que, a medida que pasa el tiempo, incrementen en cantidad de proyectos [2].

De la misma forma como se debe realizar la respectiva transición energética, también es necesario realizar los estudios pertinentes para conocer cómo varía el sistema existente ante la conexión de las fuentes de energía renovable y, en particular, demostrar que los parámetros de los activos del sistema no presentan variaciones significativas que puedan perjudicar el sistema, por el contrario, se pueden mejorar parámetros de regulación de tensión, frecuencia, estabilidad, disponibilidad de reactiva, entre otros.

Finalmente, la demanda energética tiende a crecer, por lo que la generación debe tener la misma característica. En este contexto, es fundamental realizar los estudios de conexión necesarios para tener mayor cantidad de generadores y abastecer adecuadamente cada una de las cargas del país cumpliendo con la normativa que rige los sistemas de generación, transmisión y distribución energética.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Realizar estudios de conexión simplificados y completos mediante el uso del software especializado DigSilent Power Factory para legalizar los nuevos proyectos de generación propuestos en Colombia y determinar su factibilidad.

B. Objetivos específicos

Modelar los nuevos proyectos de generación en conjunto con la respectiva zona de influencia.

Simular el flujo de potencia y cortocircuito monofásico y trifásico en puntos estratégicos del sistema y analizar los resultados.

Verificar que los nuevos proyectos cumplan con lo estipulado en los acuerdos de la CREG e IEEE para determinar su factibilidad.

Presentar los resultados obtenidos en un informe que evidencie ante las entidades competentes la factibilidad de los proyectos estudiados.

III. MARCO TEÓRICO

La energía eléctrica es una forma de energía indispensable en la actualidad, ya que es utilizada en una amplia variedad de aplicaciones en nuestra vida diaria. Desde el suministro de energía a hogares y empresas, hasta el funcionamiento de dispositivos electrónicos y sistemas de transporte, por lo que la electricidad juega un papel crítico en la economía, el bienestar y la estabilidad social [3]. La transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables es crucial dado el impacto a nivel mundial de la generación de energía por medio de fuentes fósiles, promoviendo la disminución de la huella de carbono y el estudio de nuevos proyectos renovables [4]. En todo el mundo se realizan esfuerzos para reducir la dependencia de estos combustibles fósiles y aumentar la proporción de energía producida a partir de fuentes renovables, como la energía solar y eólica [5]. Debido a la creciente demanda de energía en todo el mundo es necesario aumentar la generación de la misma manera, a medida que la población crece y la economía se expande, se espera que la demanda de energía aumente significativamente en las próximas décadas [6]. Es evidente la necesidad de estudiar cómo esta variación entre la demanda y la generación puede influir en el comportamiento de los elementos comunes para el transporte y distribución de la energía, activos como las líneas de transmisión, transformadores, compensadores capacitivos o inductivos se ven afectados cada vez que aparece un nuevo generador en el sistema eléctrico, para definir este impacto existen los estudios eléctricos realizados en software especializado con el fin de demostrar que esta variación sea beneficiosa y que los parámetros como la tensión y frecuencia no disminuyan o aumenten por fuera de los límites exigidos por la norma [7]. La energía solar fotovoltaica es una tecnología en constante evolución, y ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años debido a la reducción de los costos de producción y el aumento de la eficiencia de las celdas solares, por esta razón muchos países han optado por la proyección futura de generación solar para suplir la mayor parte de la demanda energética mediante este tipo de energía renovable [8]. En Colombia, la cantidad de proyectos instalados basados en generación solar es amplia, además de los proyectos en ejecución y en estudio dentro del Plan de Expansión de Referencia Generación Transmisión 2015 – 2029 [9], gracias a las regulaciones establecidas por la UPME, el CNO y la CREG se cuentan con acuerdos y resoluciones cuya finalidad es la instalación de los nuevos proyectos de forma responsable, segura y que beneficie tanto al propietario como al SIN, STR y SDL en términos de regulación, control y estabilidad.

IV. METODOLOGÍA

Durante los 6 meses de prácticas académicas se realizaron diferentes actividades para cumplir con los objetivos del documento, cada una de estas es importante para obtener la aprobación de los estudios eléctricos de forma satisfactoria.

El primer paso para realizar el estudio de conexión para cualquier proyecto de generación es solicitar el punto de conexión ante el respectivo OR con el fin de obtener los insumos necesarios de la red eléctrica con la zona de influencia.

Al obtener cada uno de los insumos y verificar que sean suficientes para el estudio se procede a realizar el montaje del modelo en el software especializado que se utilice para esta tarea, en FLUX S.A.S. se utiliza DIGSILENT PowerFactory como herramienta para obtener los resultados necesarios y evidenciar el correcto funcionamiento del generador al conectarse a la red eléctrica de interés. Una vez realizado el montaje y verificar el correcto funcionamiento (en ocasiones se compara con resultados enviados por el OR) se procede a establecer diferentes escenarios operativos, los estudios realizados en FLUX S.A.S. se enfocan en generación solar fotovoltaica, por lo que estos escenarios se suelen ubicar para los horarios en los que es posible generar energía con el proyecto (margen horario entre 8 a.m. y 4 p.m.), la elección de estos escenarios se basa en la curva de la demanda energética entregada por el OR intentando coincidir en los puntos de mayor demanda, menor demanda y demanda promedio.

Es necesario realizar estudios eléctricos para comparar los parámetros de la red antes del ingreso en funcionamiento del proyecto de generación y posteriormente, estos estudios se dividen generalmente en 3 tipos: flujo de potencia, cortocircuito y coordinación de protecciones. Cada uno de los estudios tiene su propio objetivo, para el análisis del flujo de potencia se observan los parámetros típicos en las barras, líneas y transformadores como la tensión, la cargabilidad, las pérdidas de potencia activa y reactiva, la variación en cada una de estas variables, la estabilidad del sistema, entre otros, cabe destacar que se simula el flujo de potencia desbalanceado para aproximarse más a las condiciones reales. En el análisis de cortocircuito es necesario estudiar casos monofásicos y trifásicos, verificando que la potencia de corto, las corrientes transitorias y subtransitorias no varíen al punto de que los elementos de protección instalados en todo el circuito no tengan la capacidad necesaria para manejar los nuevos valores, sin embargo, los inversores utilizados en los proyectos solares no suelen presentar riesgo dado que proporcionan valores muy

bajos de corriente de corto. Finalmente, se realiza la respectiva coordinación de protecciones, el objetivo principal es evitar que cualquier tipo de falla en baja tensión refleje problemas en media o alta tensión para el transporte de energía a zonas que no se encuentran en falla, por lo que los totalizadores del sistema y las protecciones instaladas en los inversores deben responder ante cualquier tipo de eventualidad, además, en caso de que la falla sea en media o alta tensión se debe asegurar que el sistema no funcione en modo isla, las protecciones del sistema deben actuar para evitar daños en los equipos instalados y para garantizar la calidad de la energía eléctrica.

Posterior a las simulaciones y los análisis es necesario realizar un informe que resuma todo el proceso, además de las características del sistema estudiado, nombre, capacidad, fecha de puesta en operación, ubicación geográfica, diagrama unifilar, datos proporcionados por el operador de red, resultados de los estudios de flujo de potencia, cortocircuito, coordinación de protecciones, gráficas, tablas y figuras que demuestren los estudios, análisis de los resultados y conclusiones, en todo el proceso se deben mencionar las normativas asociadas al proyecto provenientes de las resoluciones de la CREG, los acuerdos del CNO, los datos de la UPME y la normativa del IEEE.

Se debe enviar toda la información consolidada con los respectivos anexos al OR correspondiente para el análisis y la validación de los resultados, en caso de que la respuesta sea desfavorable, se procede a solucionar los comentarios que se realicen al proyecto para subsanar las problemáticas y, finalmente, legalizar el proyecto para su conexión al SIN, STR o SDL.

V. RESULTADOS

En la empresa FLUX S.A.S. se realizaron estudios de múltiples proyectos para su respectiva conexión a la red eléctrica de el OR correspondiente, en esta sección se mostrarán los resultados obtenidos en algunos de los proyectos realizados, detallando configuraciones y modelos en el software especializado DIGSILENT PowerFactory, gráficas obtenidas en el mismo, se especificarán normativas utilizadas en los proyectos, además de fotos en algunos de los proyectos intervenidos en la empresa. Los insumos proporcionados a la empresa, algunos nombres de los proyectos y otros parámetros no se mencionarán directamente para mantener la confidencialidad la seguridad de los proyectos realizados.

Proyecto solar Caminos-Corocito de 49,22 [KWp]:

Este proyecto fue realizado para su instalación en Pereira, Risaralda, para conocer la factibilidad de la conexión del proyecto se modeló el sistema del OR de Pereira (EEP) con el diagrama unifilar de la Figura 1.

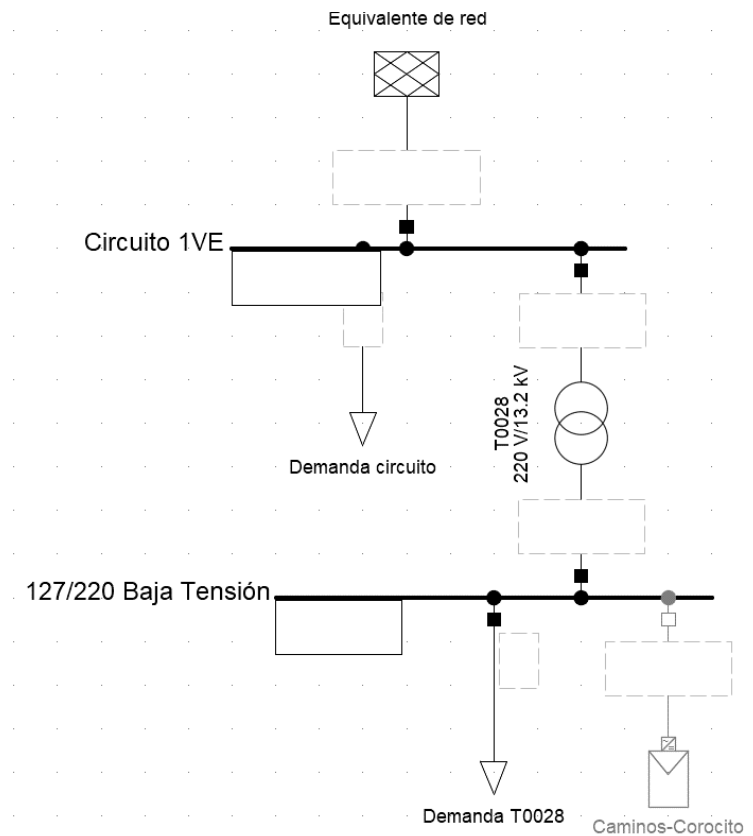


Figura 1. Diagrama unifilar de la zona de impacto.

Se identifican distintos puntos de interés a detallar para el sistema: el equivalente de red, las barras de media y baja tensión, el transformador de distribución y la conexión del proyecto solar. Para los análisis eléctricos se toma como referencia los criterios establecidos por la resolución CREG 024 de 1995 – código de redes, los rangos de variación de la tensión en condiciones de operación normal que se encuentran definidos en el artículo 6.2.1.1 de la Resolución CREG 070 de 1998, modificada por la Resolución CREG 024 de 2005 donde se establece que:

- El nivel de tensión en estado estacionario a frecuencia nominal 60 Hz deben estar dentro de los límites permitidos (59,8 y 60,2 Hz), además, para el nivel de tensión de 13,2 [kV] no se debe superar el 110% del valor nominal ni ser inferior al 90%.

- Para transformadores se consideran flujos aceptables en condiciones normales de operación cuando sean iguales o menores del 100% de su capacidad nominal.

Para este proyecto se analizaron 3 escenarios operativos dentro de la franja horaria de las 9 a.m. hasta las 3 p.m., incluyendo el medio día para observar el comportamiento a capacidad nominal. Los resultados obtenidos se observan en las Figuras 2, 3 y 4.

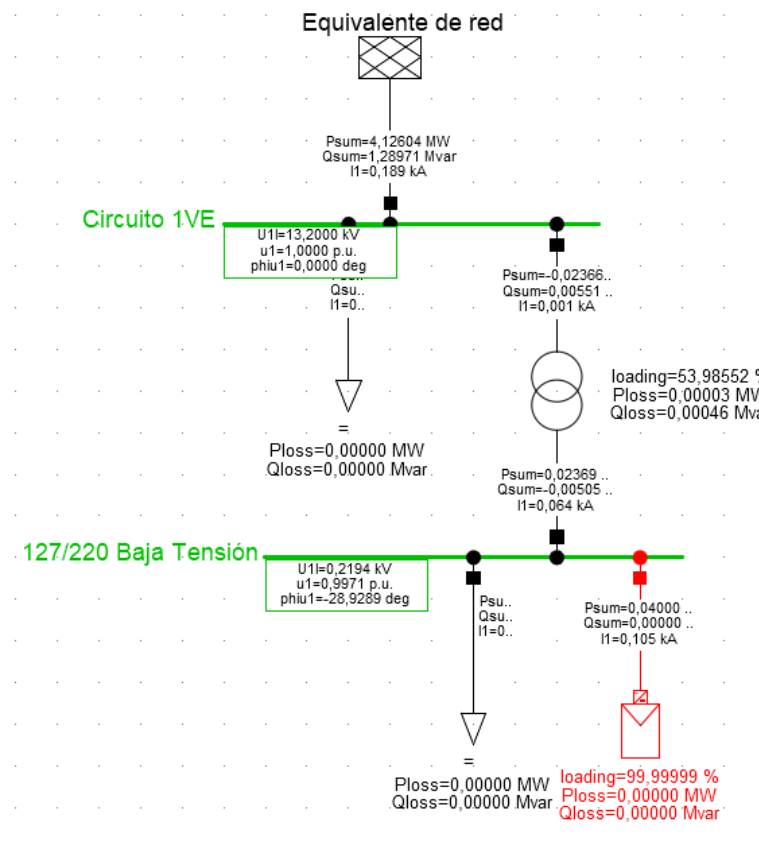


Figura 2. Flujo de potencia 9 a.m.

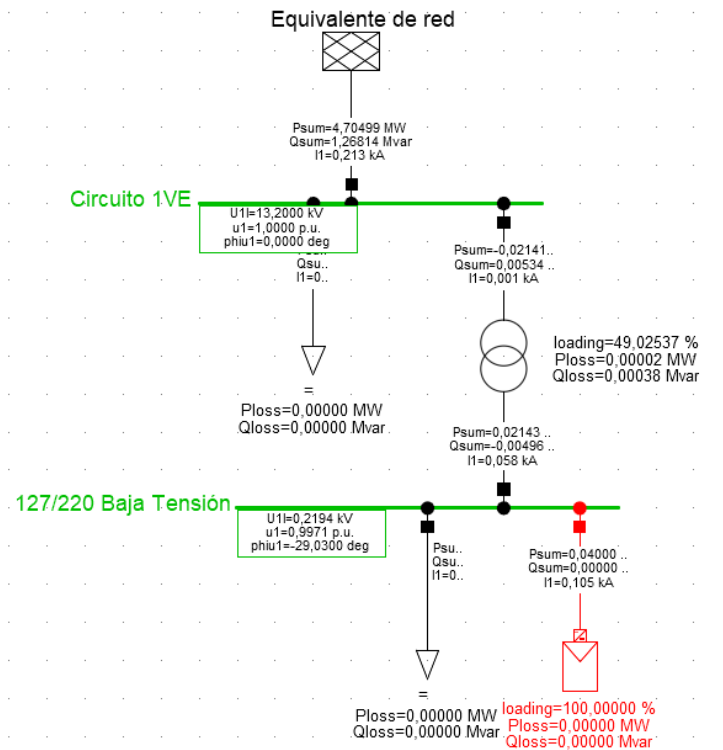


Figura 3. Flujo de potencia 12 m.

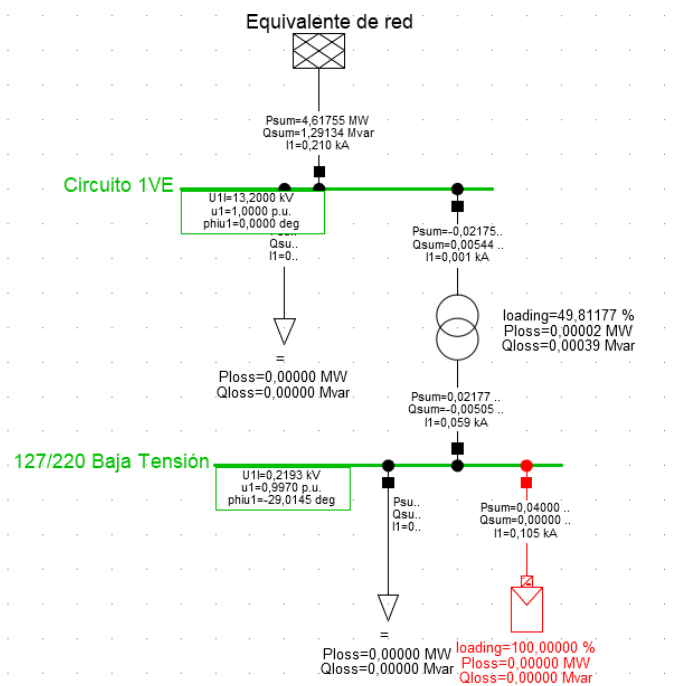


Figura 4. Flujo de potencia 3 p.m.

Como se evidencia en las Figuras 2, 3 y 4 no existió ninguna violación a la normativa respectiva en ninguno de los casos observados anteriormente, lo que demuestra que la conexión del proyecto no genera variaciones en la regulación de tensión y que para todos los casos se mantiene muy cercano al 1 [p.u.].

Para el estudio de cortocircuito se realizaron fallas monofásicas y trifásicas en las barras del sistema, además, se utilizó la normativa IEC 60909 para cortocircuito dentro del software, los resultados se resumen en las Figuras 5 y 6.

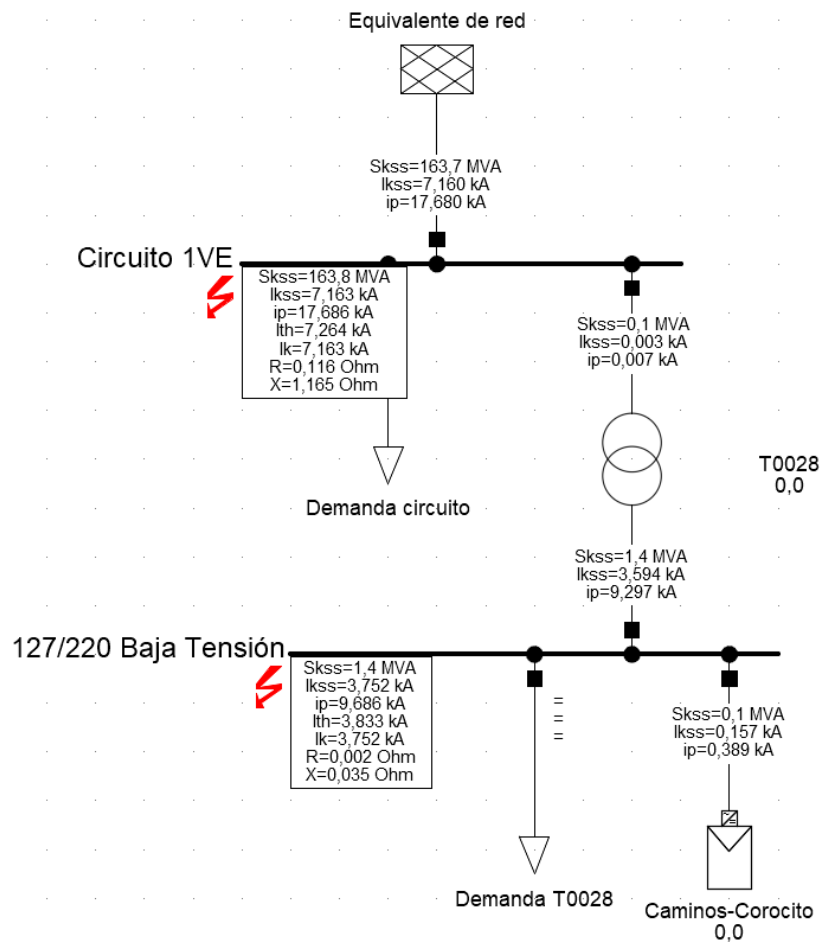


Figura 5. Cortocircuito trifásico.

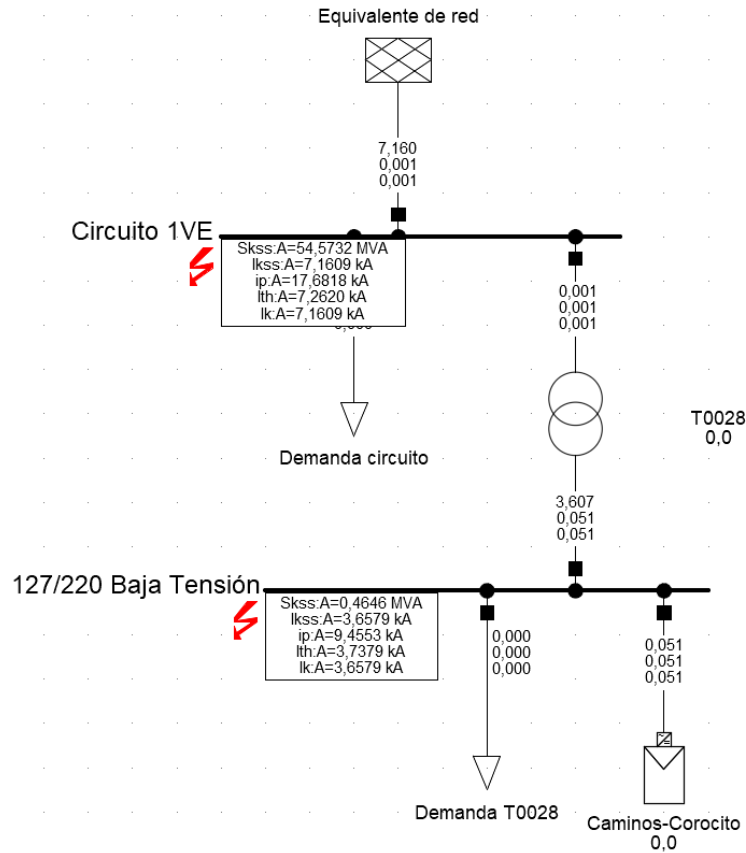


Figura 6. Cortocircuito monofásico.

El aporte de cortocircuito del sistema solar fotovoltaico es mínimo, el mayor aporte en ambos casos proviene del equivalente de red, por lo que la conexión del sistema no varía de forma determinante los valores de las corrientes de corto; esto significa que las protecciones instaladas en el circuito de EEP pueden regular sin ningún problema cualquier tipo de falla, evitando que se vea afectado su funcionamiento por el ingreso del proyecto.

El proyecto Caminos-Corocito tiene una capacidad instalada baja, por lo que el estudio se resume en los parámetros mostrados y con estos es posible afirmar que se presenta factibilidad eléctrica para su conexión, sin afectar el sistema eléctrico existente incluyendo los activos como transformadores, por lo que el proyecto fue aprobado por el OR para su construcción y conexión.

Proyecto solar Pascual Bravo Fase III:

Este proyecto solar fotovoltaico con capacidad de generación de 216 [kW], se ubica en Medellín, Antioquia, en la zona de Robledo para alimentar la institución educativa Pascual Bravo y, además, entregar los excedentes de generación a la red eléctrica del OR EPM.

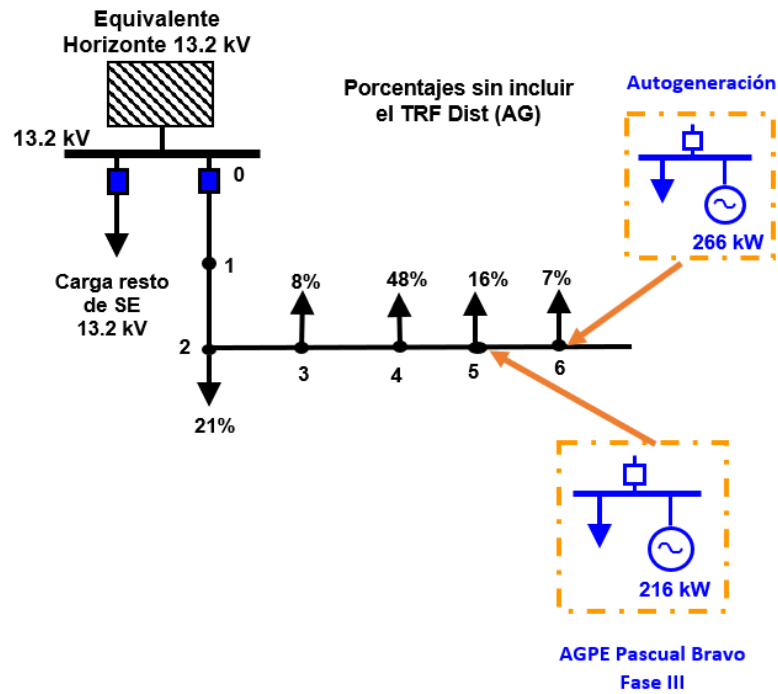


Figura 7. Diagrama unifilar de la zona de impacto.

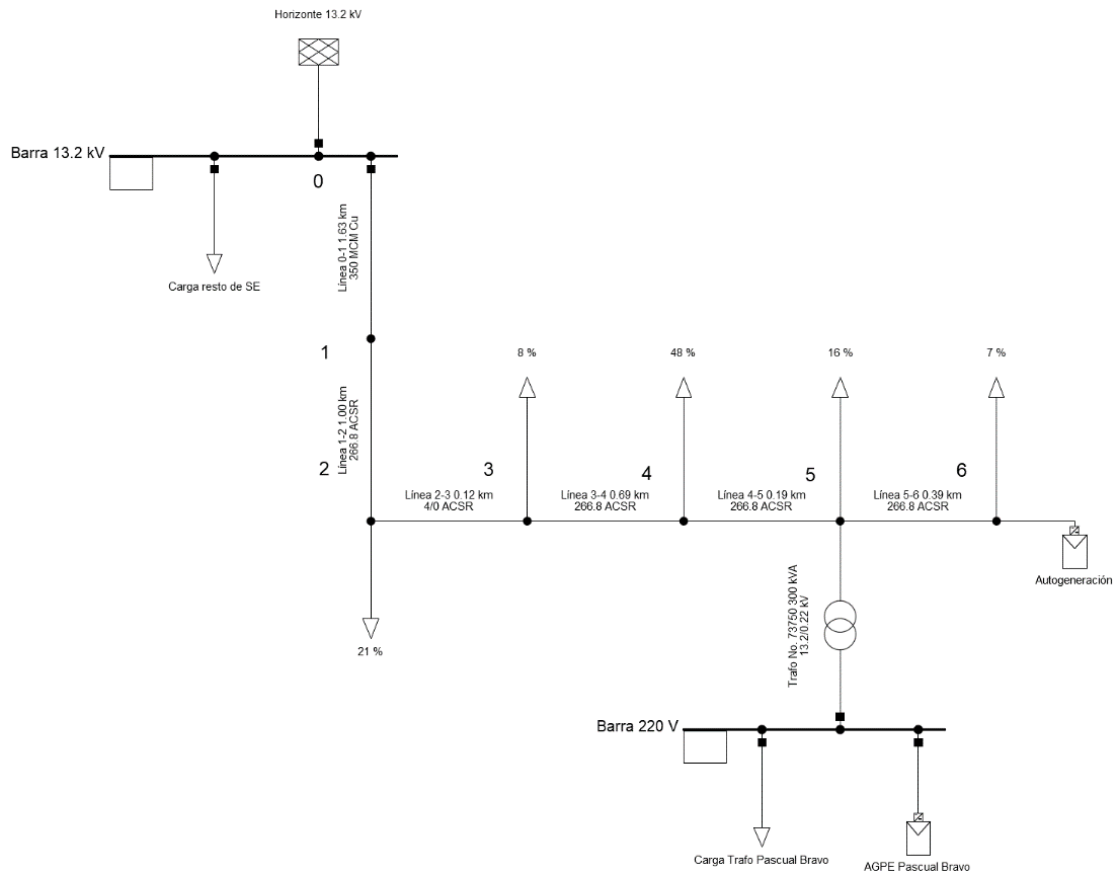


Figura 8. Modelo en software especializado.

En la Figura 7 se observa el diagrama para implementar el modelo en DIGSILENT PowerFactory, la demanda en el circuito de EPM fue proporcionada en porcentajes, por lo que en este proyecto se distribuyó el total de la demanda del circuito en cada uno de los nodos con el porcentaje correspondiente; además, dentro del área de impacto se contempló otro sistema de autogeneración de 266 [kW] para conocer las variaciones y los efectos del nuevo sistema solar fotovoltaico sobre la red eléctrica. Los resultados de flujo de carga se observan a continuación.

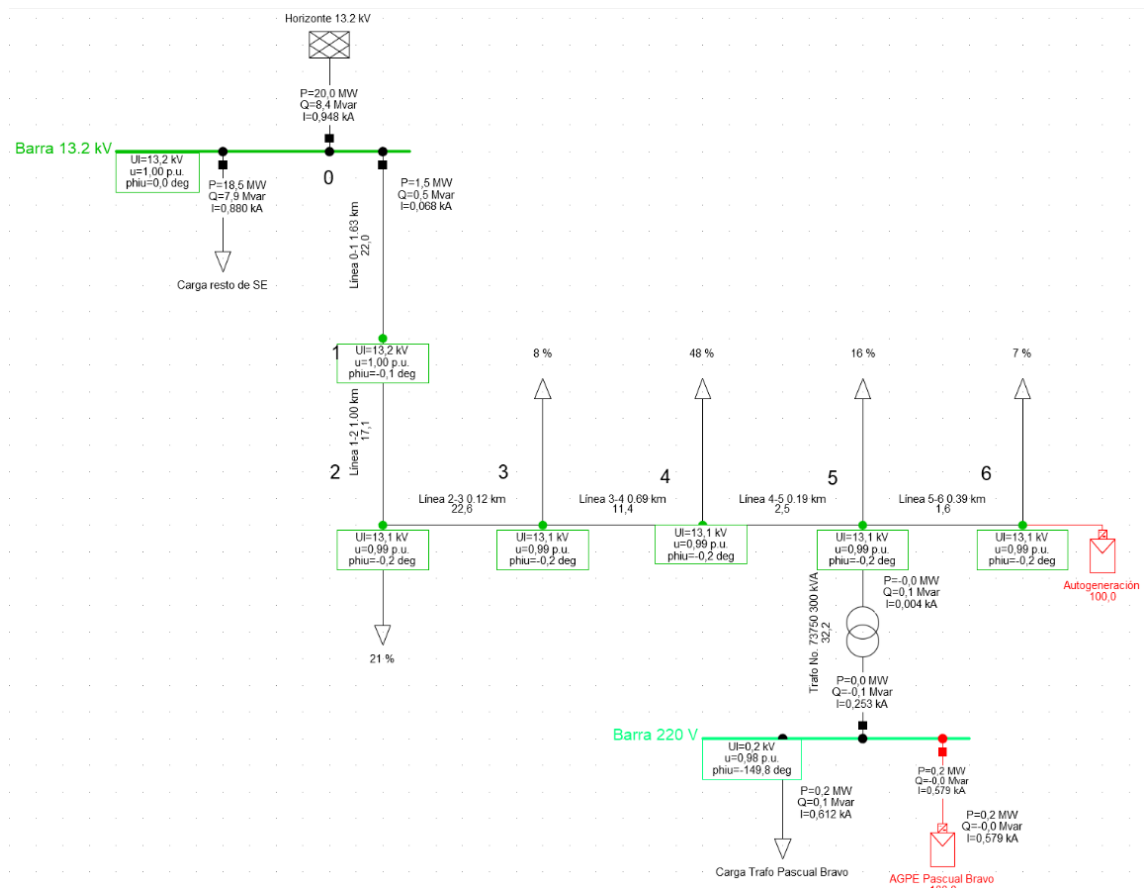


Figura 9. Flujo de potencia 9 a.m.

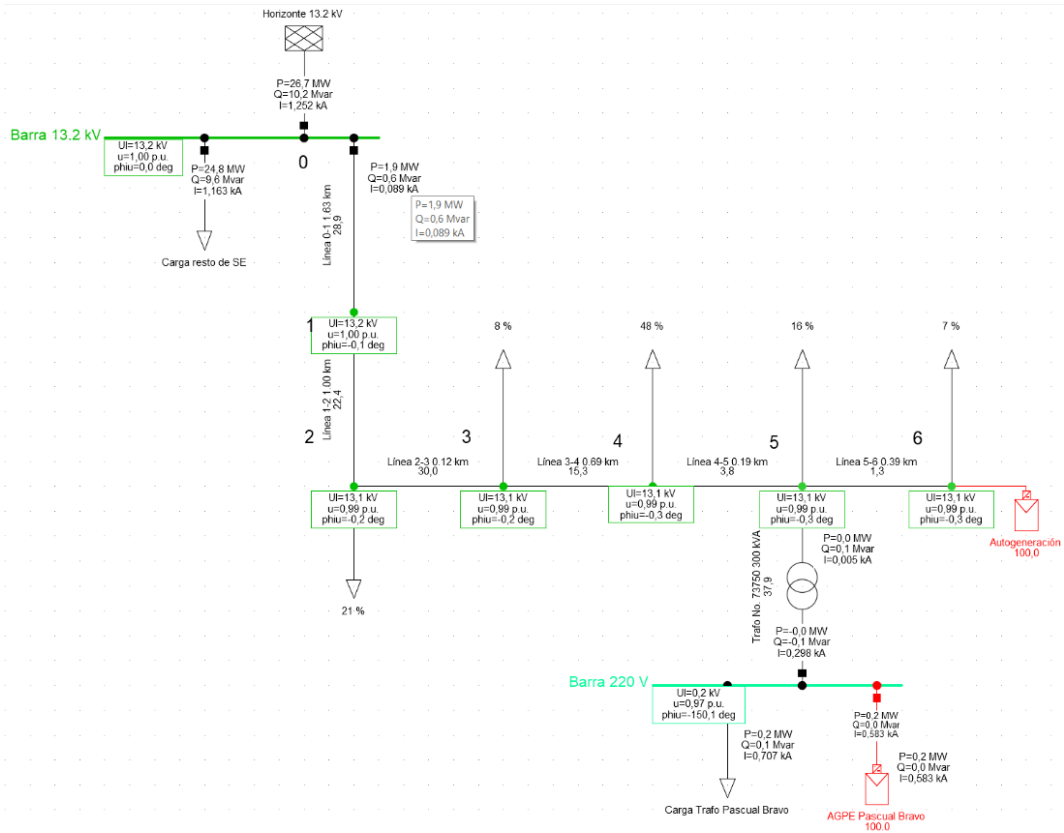


Figura 10. Flujo de potencia 12 m.

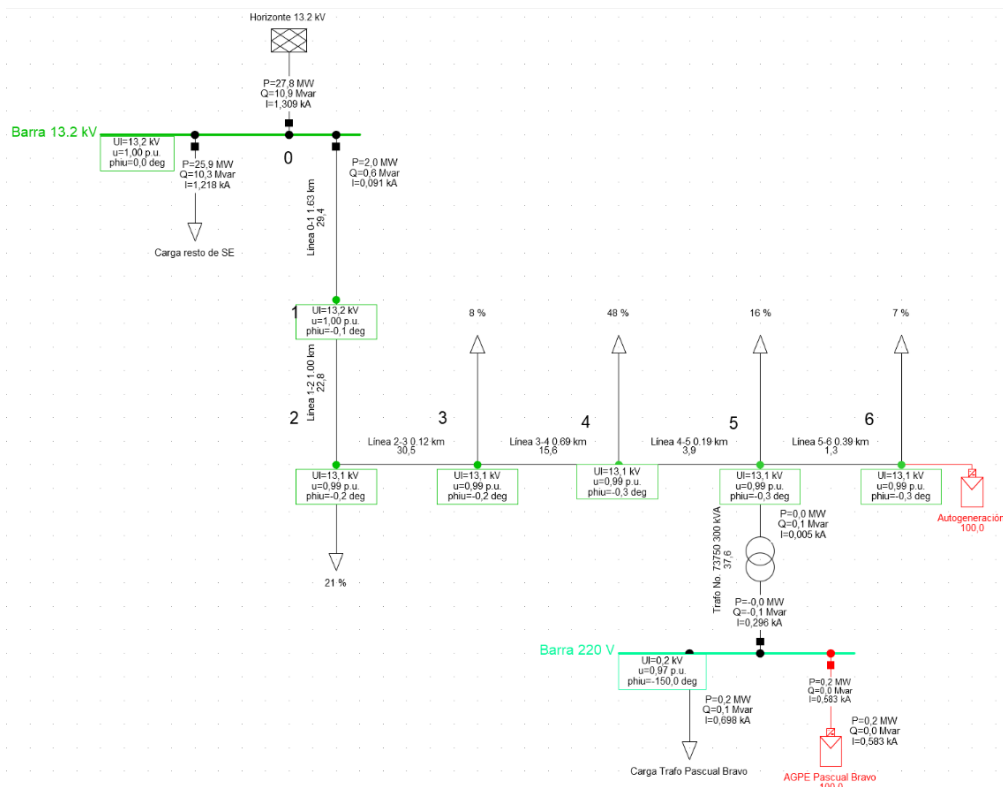


Figura 11. Flujo de potencia 3 p.m.

Para analizar correctamente el impacto del flujo de carga al conectar el proyecto Pascual Bravo Fase III es importante observar las variables correctas, en las Figuras 9, 10 y 11 se presentan los resultados para cada escenario operativo con la demanda correspondiente otorgada por el OR EPM, el nivel de tensión del circuito es de 13,2 [kV] proveniente de la subestación Horizonte, para este nivel de tensión la CREG 082 de 2002 establece que la regulación de tensión debe ser mayor al 90 % y menor al 105 % del valor nominal, todos los valores dentro de este rango se consideran permisibles. En general, para todos los casos de las barras y nodos en la zona de impacto las tensiones se encuentran muy cerca del 1 [p.u.], por lo que se cumple con lo establecido por la normativa y el proyecto solar fotovoltaico no presenta ningún tipo de riesgo en términos de regulación de tensión.

Para el estudio de cortocircuito se realizaron fallas monofásicas y trifásicas en las barras del sistema con la norma IEC 60909.

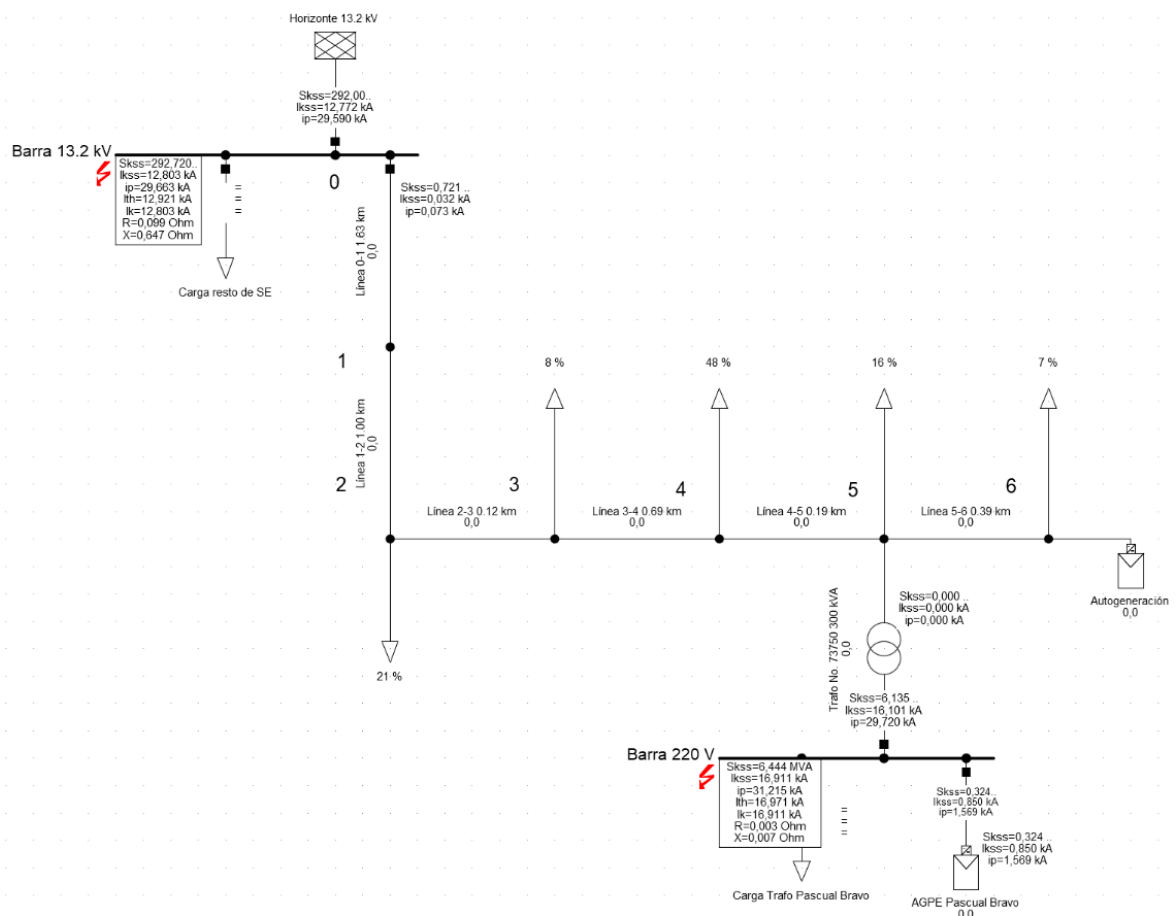


Figura 12. Resultados cortocircuito trifásico

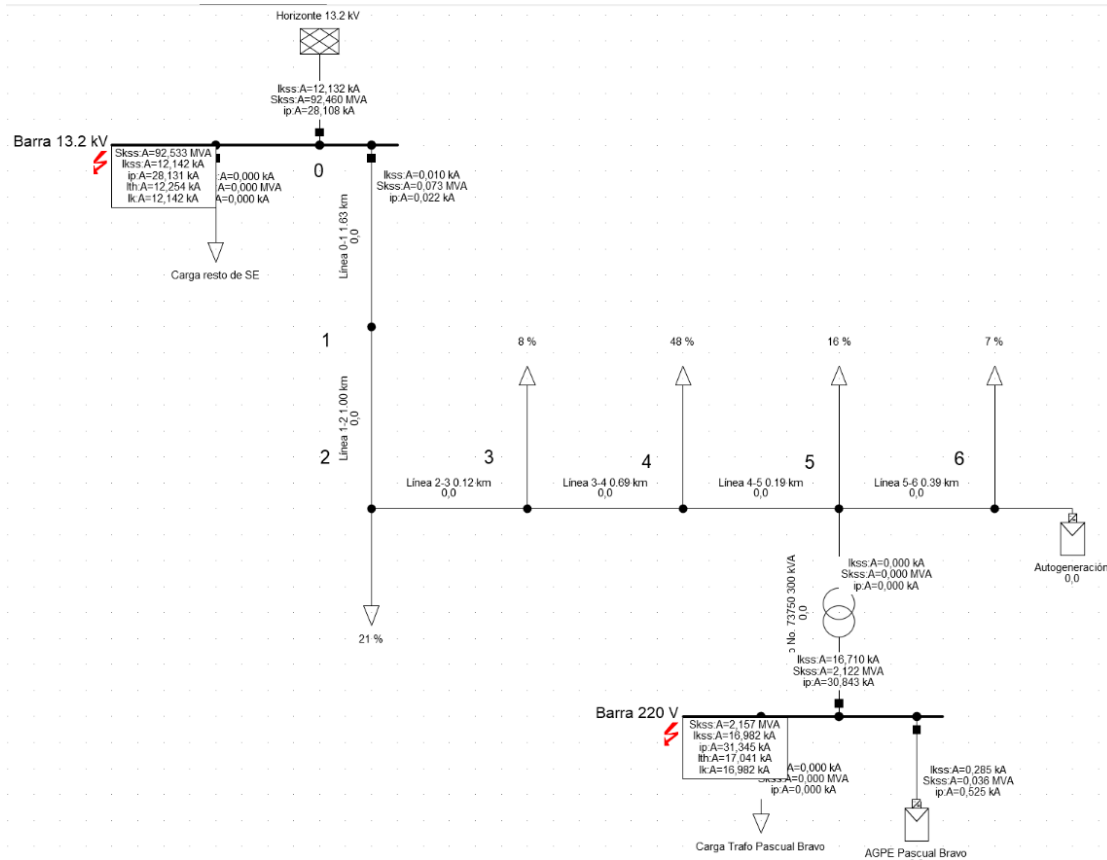


Figura 13. Resultados cortocircito monofásico

Los inversores del proyecto se modelaron como un equivalente de máquina síncrona con un aporte de cortocircito un 50 % mayor del valor nominal que puede generar el sistema, con la finalidad de evaluar condiciones más críticas, sin embargo, en las Figuras 12 y 13 se evidencia que los niveles de corto y de potencia de corto que proporciona el proyecto son mínimos en comparación al proveniente desde el equivalente de red, el nivel de corto no aumenta de forma significativa lo que indica que todos los elementos de protección que existen dentro del circuito no necesitan ser cambiados ya que pueden seguir operando sin ningún tipo de problema.

Para este estudio se requirió la realización de una coordinación de protecciones, los parámetros de las protecciones de cabecera y del transformador de corriente de la subestación Horizonte 13,2 [kV] fueron proporcionados por el OR EPM, el totalizador del cliente es de marca LS SUSOL con referencia TE160N de 125 [A], además, se cuenta con una protección en el tablero del sistema solar fotovoltaico de marca LS Metasol con referencia ABN103 de la misma capacidad. Para poder demostrar el correcto funcionamiento de las protecciones se modelaron en DIGSILENT PowerFactory con los valores de las curvas y los tipos que correspondían, el resultado se observa en la Figura 14 y 15 para el caso trifásico y monofásico respectivamente.

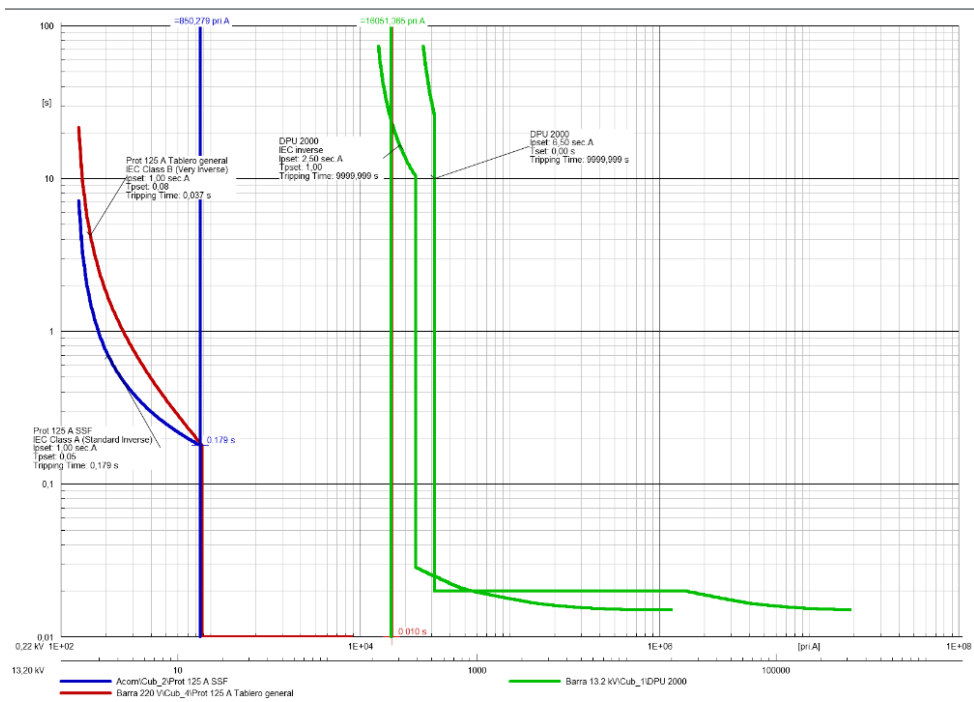


Figura 14. Resultados coordinación cortocircuito trifásico.

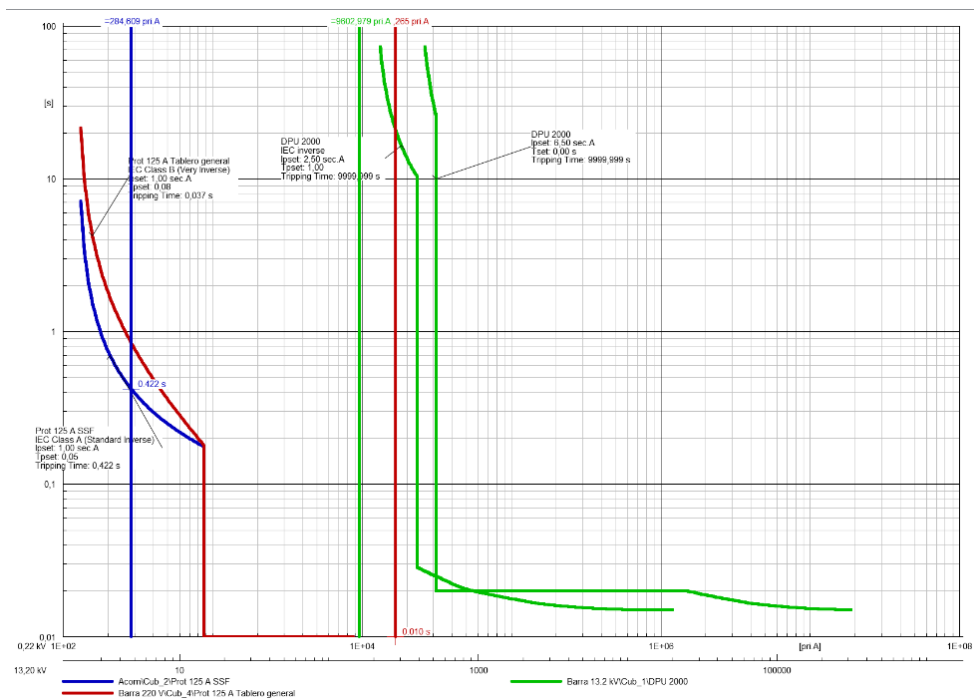


Figura 15. Resultados coordinación cortocircuito trifásico.

Al momento de generarse la falla trifásica se evidencia en la Figura 14 que la protección encargada de actuar es la perteneciente al totalizador del sistema a los 0,037 [s], seguida de la del tablero del sistema solar fotovoltaico que actúa en 0,179 [s] para el caso simulado, no se registran

alteraciones ni perturbaciones en las protecciones de cabecera de la subestación, por este motivo primero actuará la protección local del sistema solar ante los casos de falla trifásica, sin afectar el sistema existente.

En el caso monofásico se presenta la misma situación que en el trifásico, las componentes de secuencia positiva, negativa y cero no afectan las protecciones de cabecera en la subestación, por lo cual actuará el totalizador del sistema, seguido de la protección del tablero del proyecto solar fotovoltaico, de forma rápida y segura para el sistema. En ninguno de los dos casos de la coordinación de protecciones con la falla monofásica y trifásica se evidenció alguna perturbación a las protecciones de la subestación, por lo que en caso de falla en el lado de baja tensión del sistema no se presenta ningún tipo de inconveniente aguas arriba.

Los resultados de flujo de carga, cortocircuito y coordinación de protecciones demuestran que el proyecto solar fotovoltaico Pascual Bravo Fase III no presenta ningún problema para su respectiva conexión a la red eléctrica de EPM, es factible la incorporación de este autogenerador.

Proyecto solar fotovoltaico Wilder Holder 7,36 [kWp]:

El proyecto Wilder Holder con una potencia nominal DC de 7,36 [kWp] para autogeneración, instalado en el Cabuyal de Calarcá, Quindío, interconectado con la subestación Caimo 13,2 [kV], el proyecto se presentó ante el OR EDEQ. En este estudio particularmente se realizaron análisis eléctricos para el año 2023, y una proyección de 7 años a futuro con el fin de evaluar el crecimiento en la demanda energética de la zona y los posibles efectos del funcionamiento del proyecto. La demanda en el sistema se divide en porcentajes que se ubican en la distribución del ramal del circuito desde la subestación el Caimo hasta la ubicación del proyecto Wilder Holder, el diagrama de la zona de impacto en conjunto con el proyecto solar fotovoltaico se observa en la Figura 16.

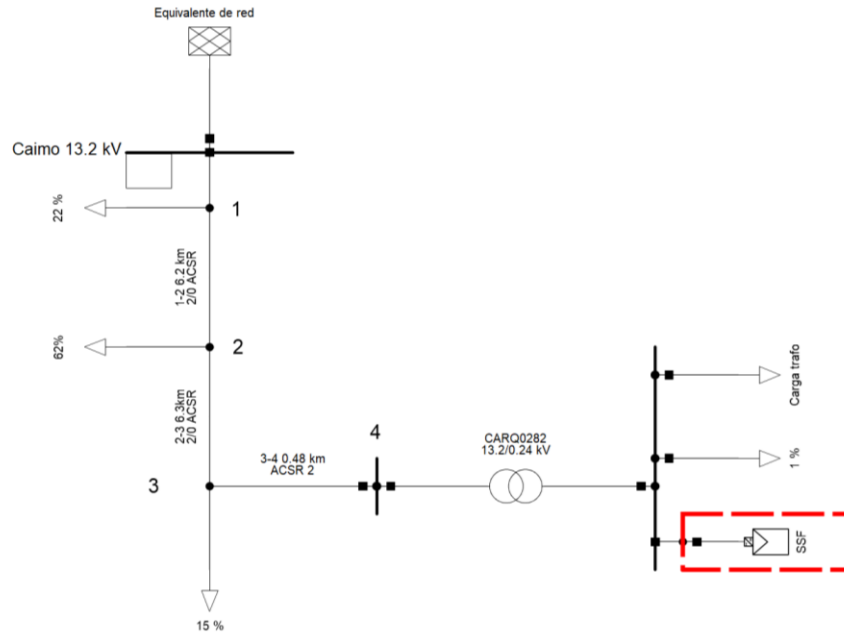


Figura 16. Diagrama unifilar de la zona de impacto.

Las Figuras 17, 18, 19 y 20 corresponden a la comparación del circuito sin el proyecto y bajo los impactos del sistema solar fotovoltaico en el año 2023 y la proyección al año 2030.

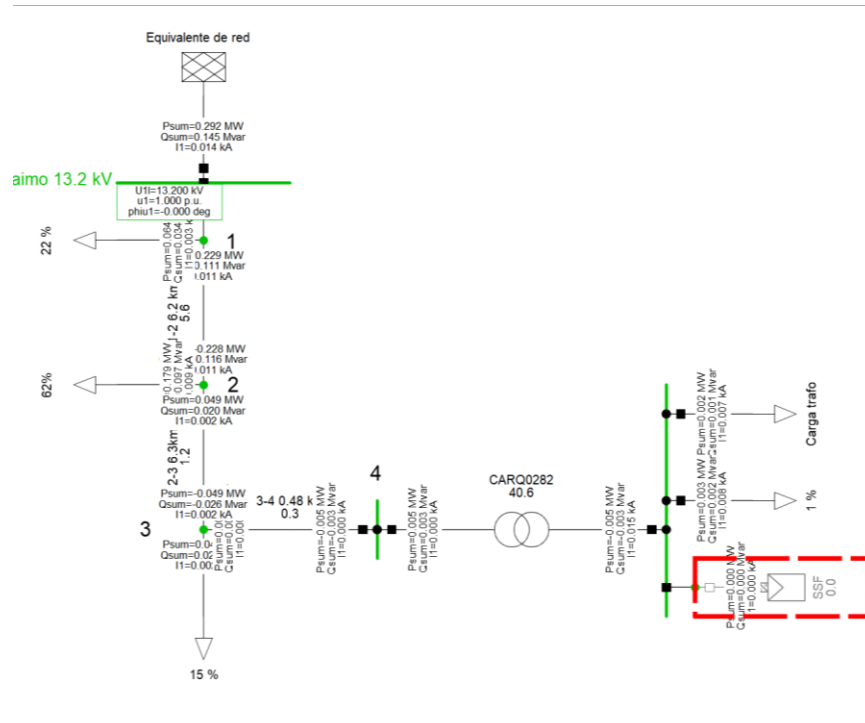


Figura 17. Caso Planta Solar FV OFF 2023.

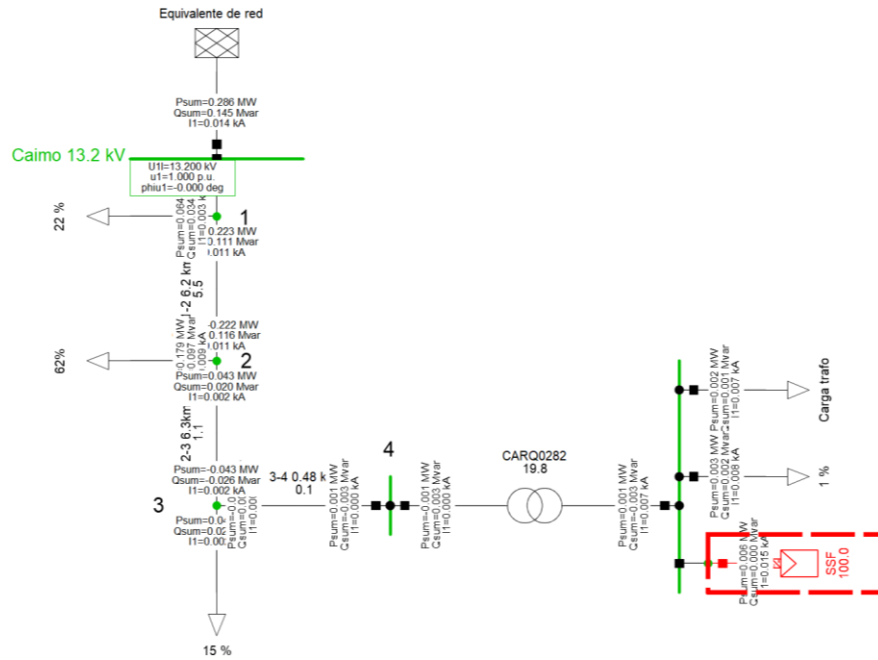


Figura 18. Caso Planta Solar FV ON 2023.

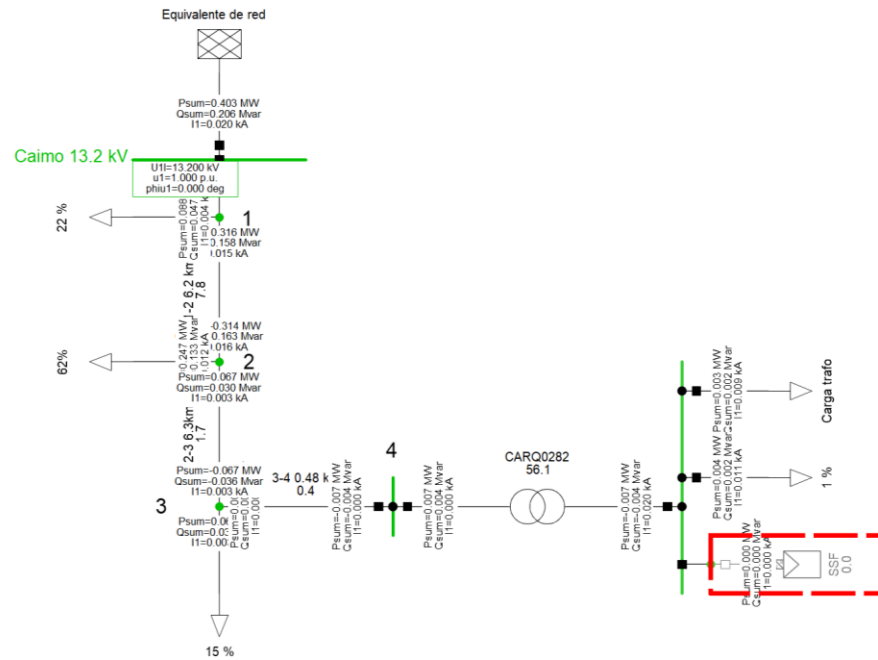


Figura 19. Caso Planta Solar FV OFF 2030.

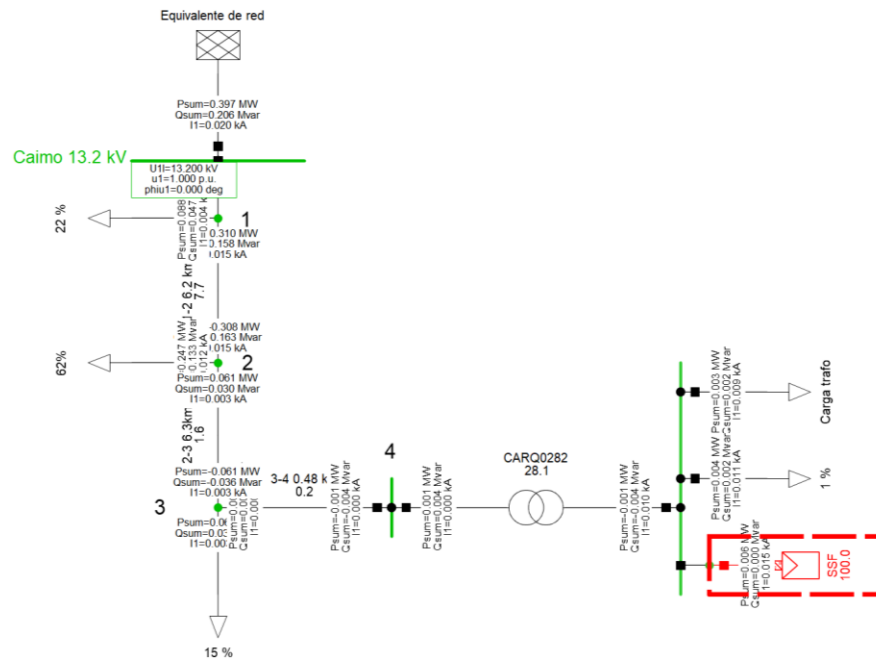


Figura 20. Caso Planta Solar FV ON 2030.

Se observa un adecuado comportamiento de las tensiones en barras de la zona de impacto del proyecto. Como resultado de la simulación, en el nodo de conexión con la entrada del sistema, el máximo incremento en el perfil de tensión en dicho nodo es menor del 1 %, por lo que el proyecto solar no varía significativamente los valores de regulación de tensión tanto para el caso del año 2023 como para la proyección a futuro en el 2030, todos los valores siguen estando dentro de los límites permitidos por la norma y se mejora la regulación (para las cifras significativas, sin embargo, el incremento es mínimo). En general, para todos los nodos y barras del sistema se observa el mismo comportamiento; la regulación de tensión en las barras aumenta levemente y pasa a estar un poco más cerca de 1 [p.u.], en ninguno de los casos se observan valores fuera de los límites permitidos. Es posible afirmar que en el 2030 debido al incremento de la demanda la tendencia de la regulación es disminuir un poco; sin embargo, el cambio es mínimo y no se evidencian impactos negativos en la red. Se concluye que el ingreso en funcionamiento del proyecto solar fotovoltaico no afecta la regulación de tensión de las barras y nodos existentes. Se evidencia que la conexión del proyecto para las líneas de todo el circuito y el transformador de distribución no genera problemas de cargabilidad. Se observa una disminución en el porcentaje de cargabilidad de las líneas y transformador al encender el sistema solar, esto debido a que la demanda está siendo alimentada por el proyecto, redirigiendo el flujo de potencia desde el mismo

nodo donde se localizan los inversores atendiendo la demanda local del sistema, además de entregar los excedentes a la red. Sin embargo, al ser un proyecto con baja capacidad instalada la variación de la cargabilidad es casi imperceptible. Igualmente, para la proyección del año 2030 se observa que los valores continúan estando por debajo del 100 % de la capacidad, por lo que a futuro tampoco existen complicaciones al ingresar el sistema solar fotovoltaico.

Para el estudio de cortocircuito se realizaron fallas en las barras del sistema monofásicas y trifásicas.

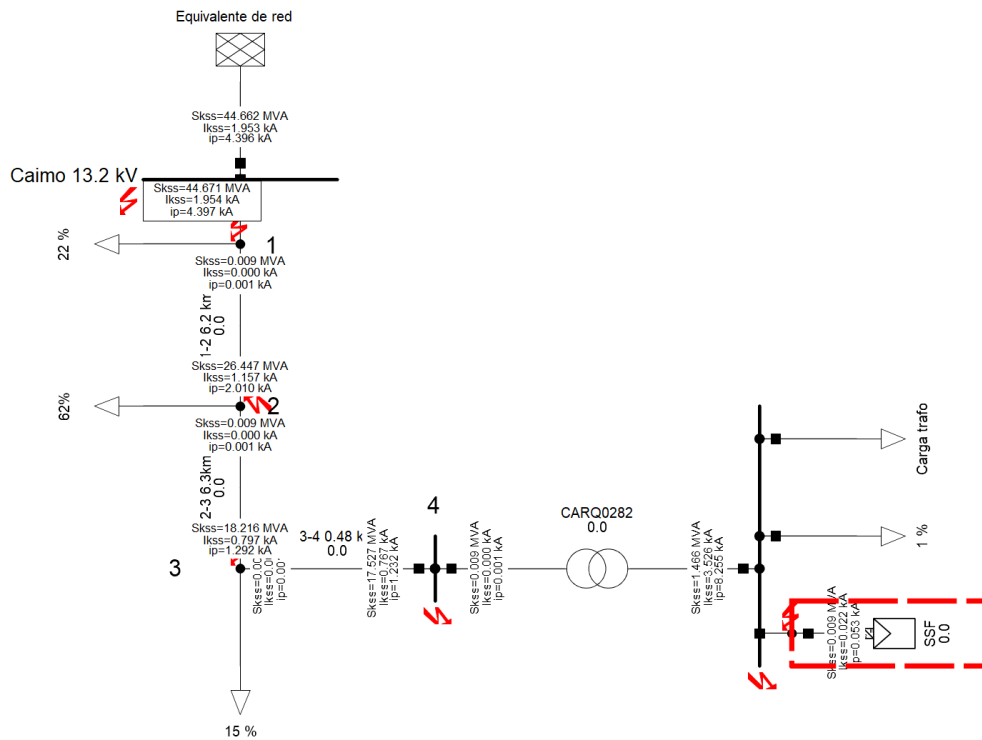


Figura 21. Resultados de cortocircuito trifásico.

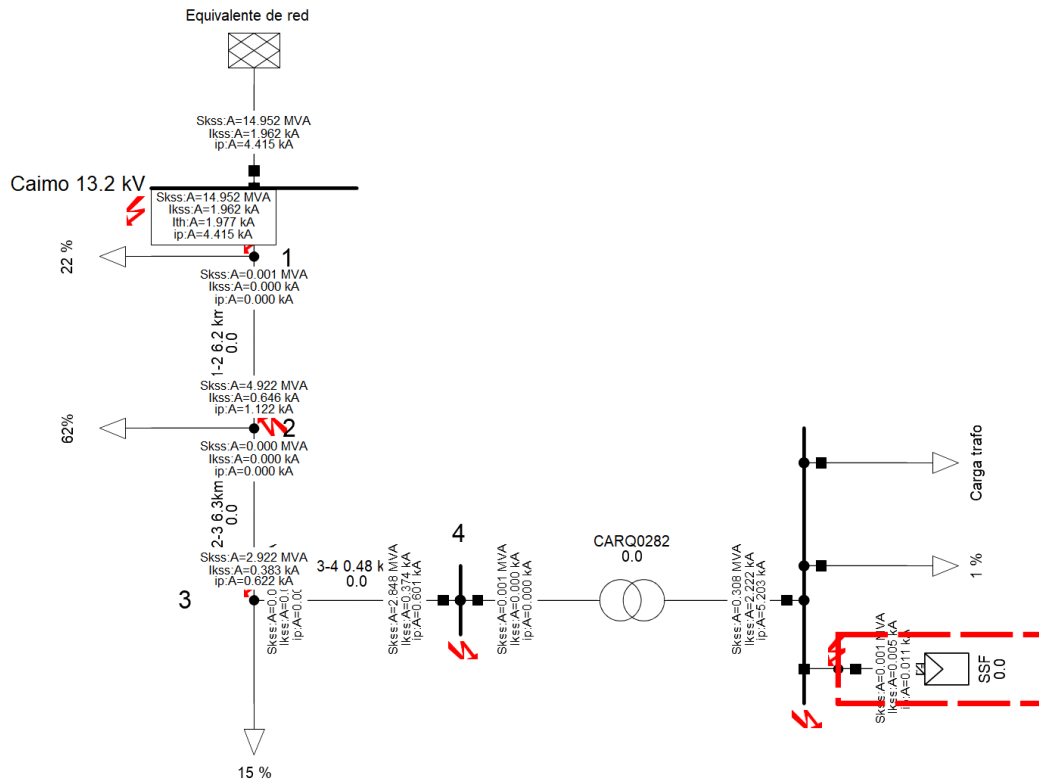


Figura 22. Resultados de cortocircuito monofásico.

En general, los niveles máximos de cortocircuito obtenidos en los barrajes y nodos de todo el circuito no presentan cambios significativos ya que la producción energética de la planta, al ser un sistema solar fotovoltaico, depende de la radiación solar por lo que su corriente se ve limitada a la cantidad de radiación que haya en el instante de tiempo que se evalúa.

Para el estudio de coordinación de protecciones se modelaron los relés de cabecera de la subestación, los relés en la línea de transmisión, un fusible tipo 4K para el transformador de distribución y el totalizador del proyecto de 40 [A].

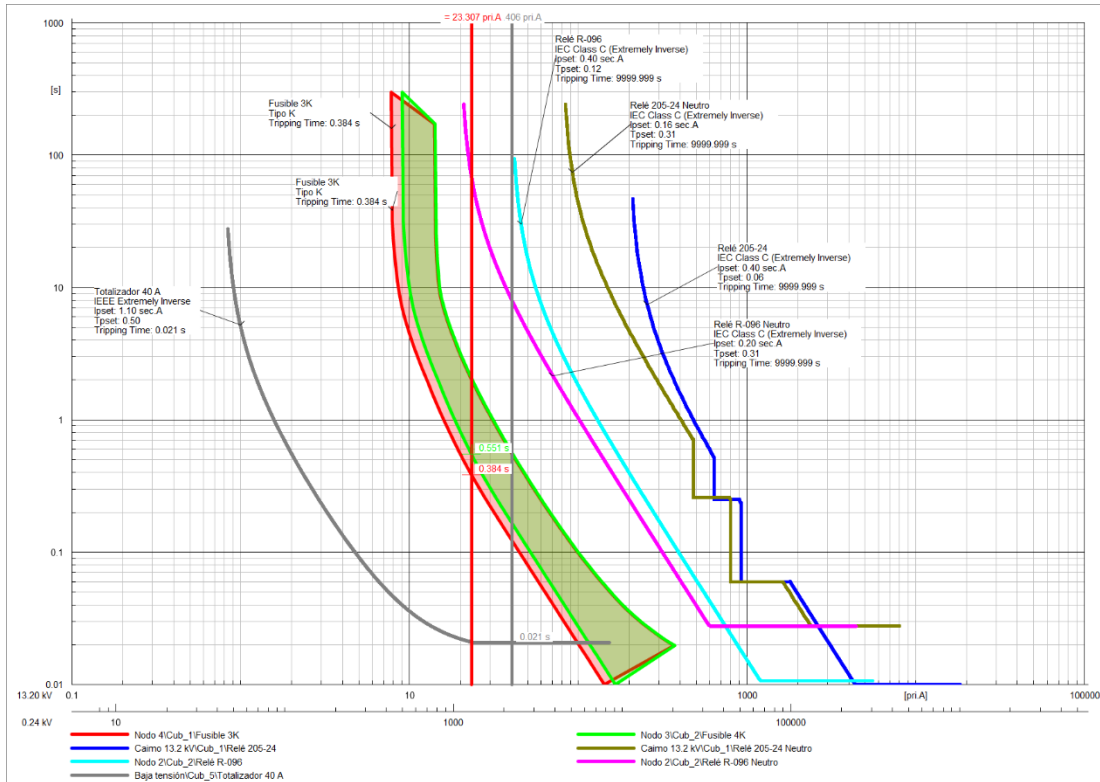


Figura 23. Coordinación falla monofásica baja tensión.

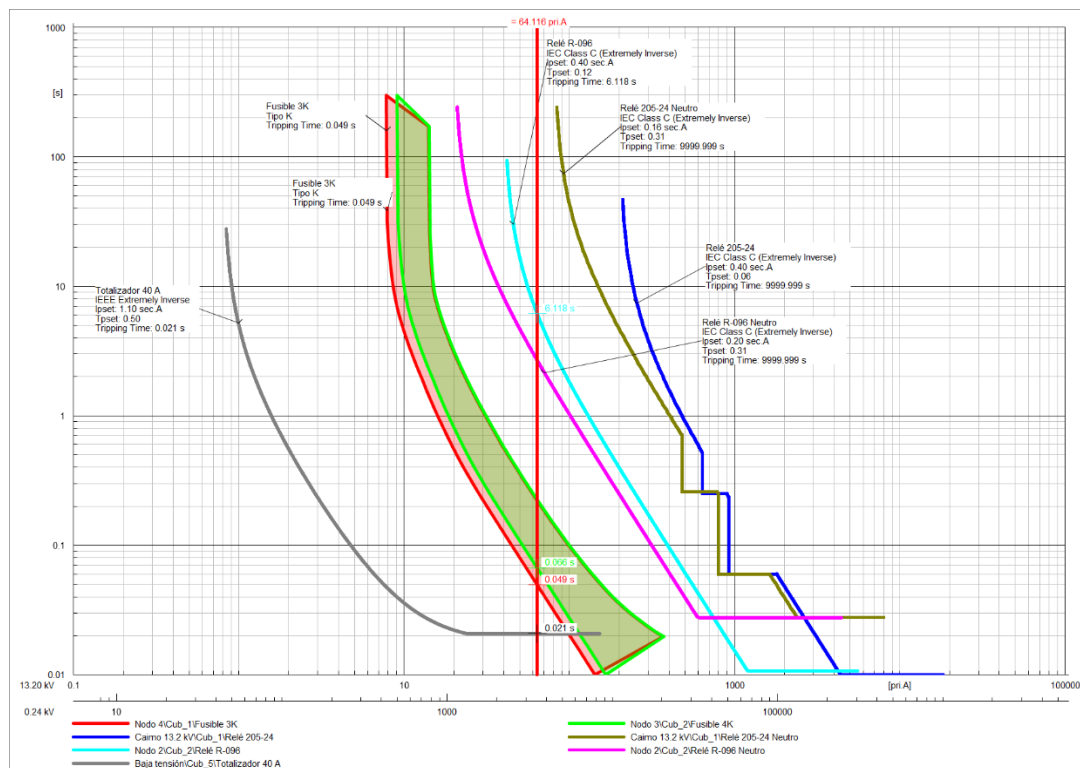


Figura 24. Coordinación falla trifásica baja tensión.

En ambos casos de cortocircuito monofásico y trifásico la protección totalizadora de 40 [A] actúa en primer lugar, seguida del fusible ubicado en el transformador de distribución; en caso de que ambas protecciones fallaran para despejar el problema (situación de baja probabilidad) entraría en funcionamiento el relé del circuito evitando que el cortocircuito genere problemas aguas arriba en media tensión, en general, la coordinación presentada en la simulación es adecuada y demuestra que las protecciones instaladas actúan de manera óptima y rápida ante cualquier tipo de contingencia.

Finalmente, gracias a los resultados de los estudios eléctricos realizados el proyecto solar Wilder Holder presenta viabilidad de conexión a la red eléctrica del OR EDEQ.

Proyecto solar fotovoltaico ULTRACEM 4,085 [MW]:

ULTRACEM es un proyecto solar fotovoltaico con una potencia nominal instalada de 4085 [kW] AC para autogeneración, instalado en el circuito de CEMENTOS Y CONCRETOS DEL ATLÁNTICO, interconectado con la subestación Cordialidad 13,8 [kV]. El proyecto inyecta los excedentes de energía a la red operada por el OR Air-e.

En la Figura 25 y 26 se muestra el diagrama unifilar del circuito de Air-e, en el cual se modela el equivalente de red de la subestación Cordialidad 13,8 [kV], la carga equivalente del resto de la subestación y las cargas del ramal de interés.

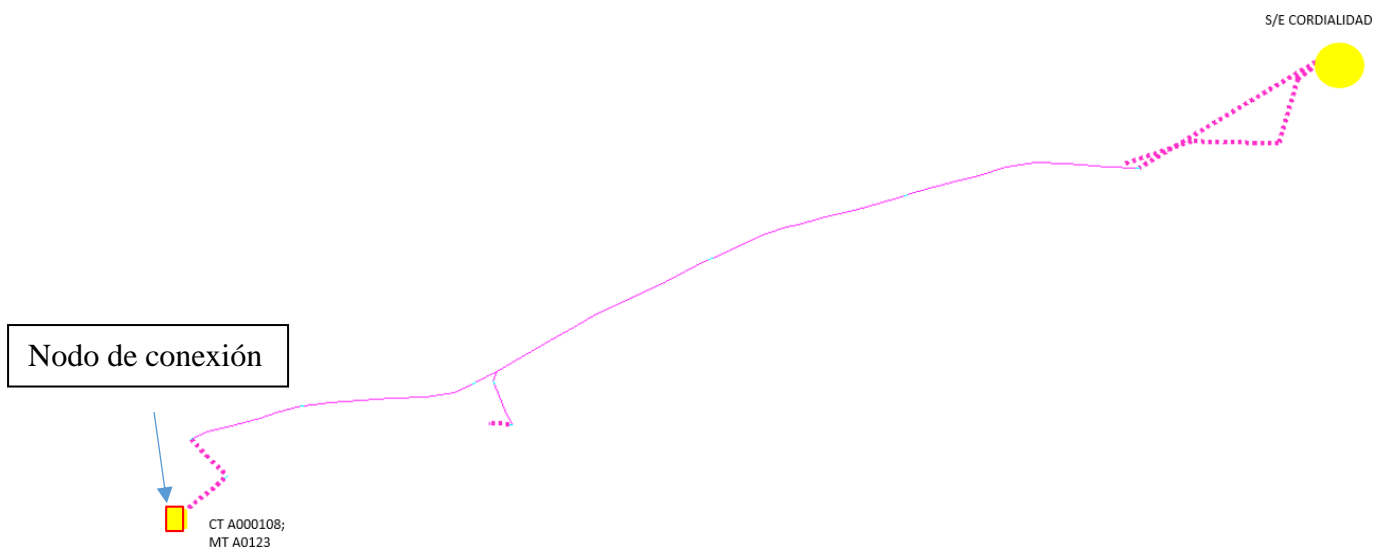


Figura 25. Subestación Cordialidad, ramal del circuito y punto de conexión.

Para realizar el estudio de forma adecuada se ubicó en el punto de conexión el transformador del proyecto de 13,8/0,8 [kV], en conjunto con la demanda local del cliente y el proyecto conectado a nivel de tensión de 800 [V]. El resultado de flujo de carga se observa a continuación.

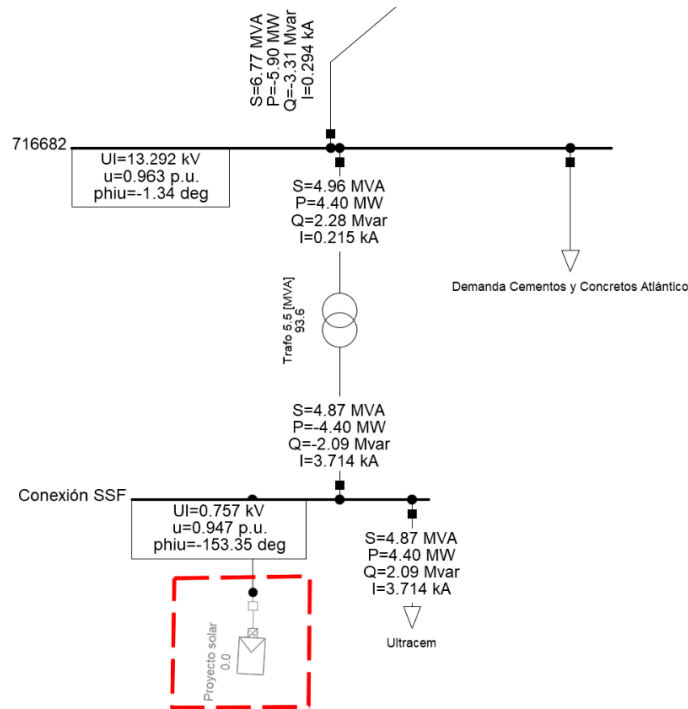


Figura 26. Flujo de carga caso base proyecto solar OFF.

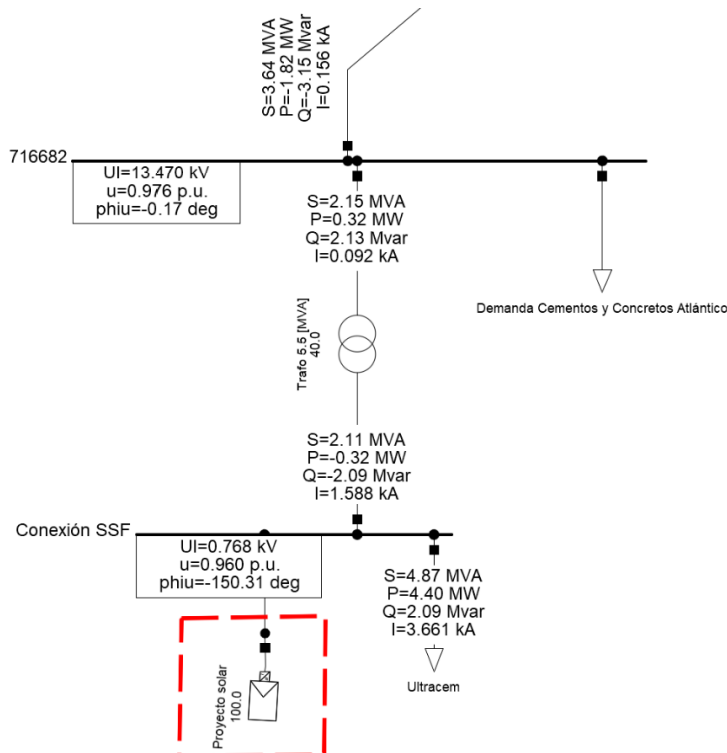


Figura 27. Flujo de carga caso base proyecto solar ON.

En general, las tensiones en barras de la zona de impacto del proyecto ULTRACEM no presentaron problemas de regulación de tensión, como resultado de la simulación en el nodo de conexión del proyecto solar número 716682 con tensión de 13,8 [kV] se observa que, con la entrada del sistema solar, el máximo incremento en el perfil de tensión es de aproximadamente el 1,285 %, mejorando incluso la regulación de tensión. En general, para todos los nodos y barras del sistema se observa el mismo comportamiento, la regulación de tensión en las barras aumenta y pasa a estar más cerca de 1 [p.u.], en ninguno de los casos se observan valores fuera de los límites permitidos. Se concluye que el ingreso en funcionamiento del proyecto solar fotovoltaico no afecta la regulación de tensión de las barras y nodos existentes.

Para el estudio de cortocircuito, en ningún caso, se puede sobrepasar la máxima capacidad de interrupción en los equipos, el nivel de cortocircuito en subestaciones existentes empieza a ser crítico y motivo de alarma cuando supera el 90% de su capacidad. El estudio se realizó bajo la norma IEC 60909 para caso de cortocircuito monofásico y trifásico en todas las barras del sistema.

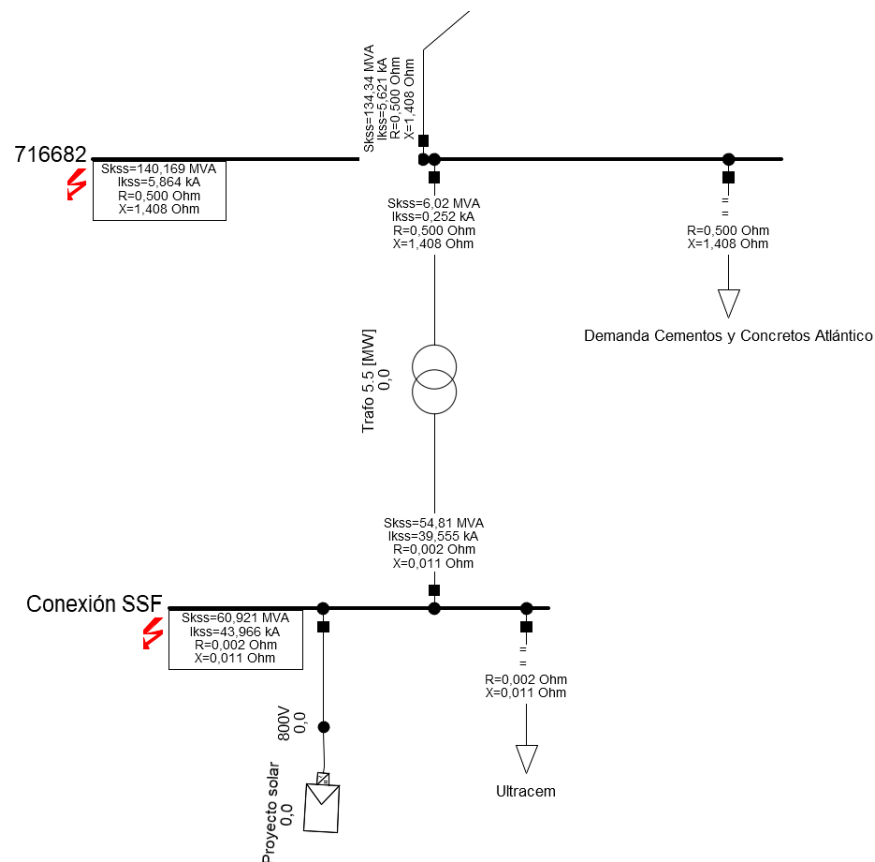


Figura 28. Cortocircuito monofásico.

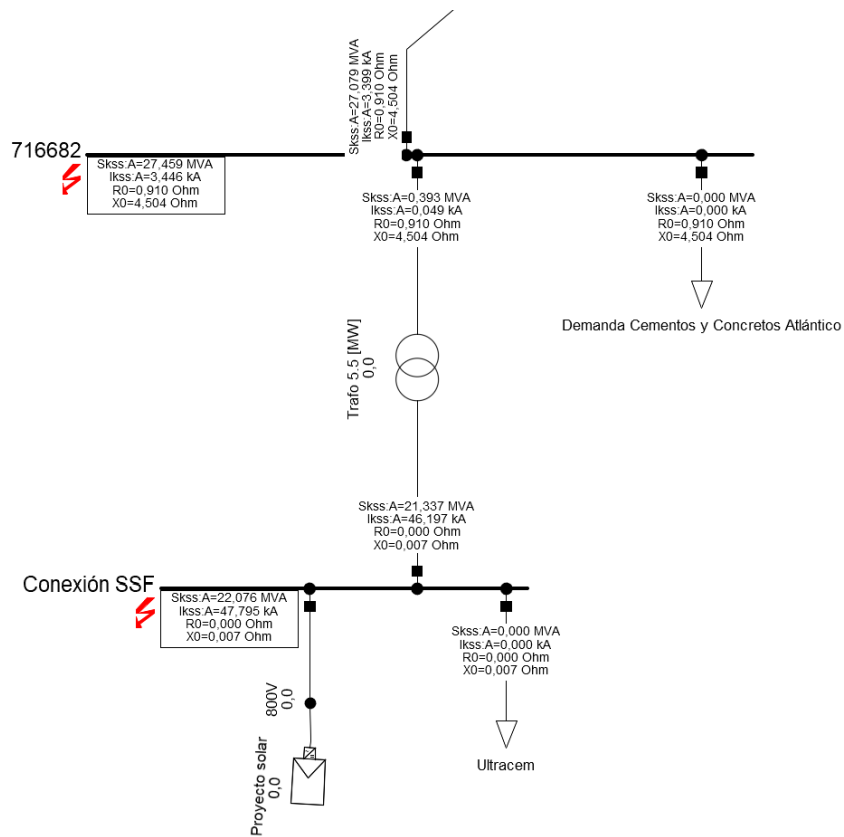


Figura 29. Cortocircuito trifásico.

La corriente de cortocircuito y la potencia de corto para el caso monofásico y trifásico que aportan los inversores no es relevante para el resto del sistema, si bien existe parte de la corriente que fluye desde el inversor, no es suficiente para superar las capacidades de las protecciones instaladas a lo largo del circuito de Cementos y Concretos del Atlántico, por esto es posible afirmar que la entrada en funcionamiento del proyecto ULTRACEM no afecta las protecciones y los niveles de corto del circuito de Air-E.

Finalmente, para el estudio de coordinación de protecciones se ajustaron las curvas propias del circuito de Cementos y Concretos del Atlántico con los datos otorgados por Air-E, además de las protecciones de los relés en media tensión aguas arriba del transformador de distribución, tanto de fase como de tierra y la protección totalizadora de 4000 [A]. Se realizaron pruebas en baja tensión y en media tensión, a lo largo del circuito y a la salida de la subestación Cordialidad. Los resultados se presentan a continuación.

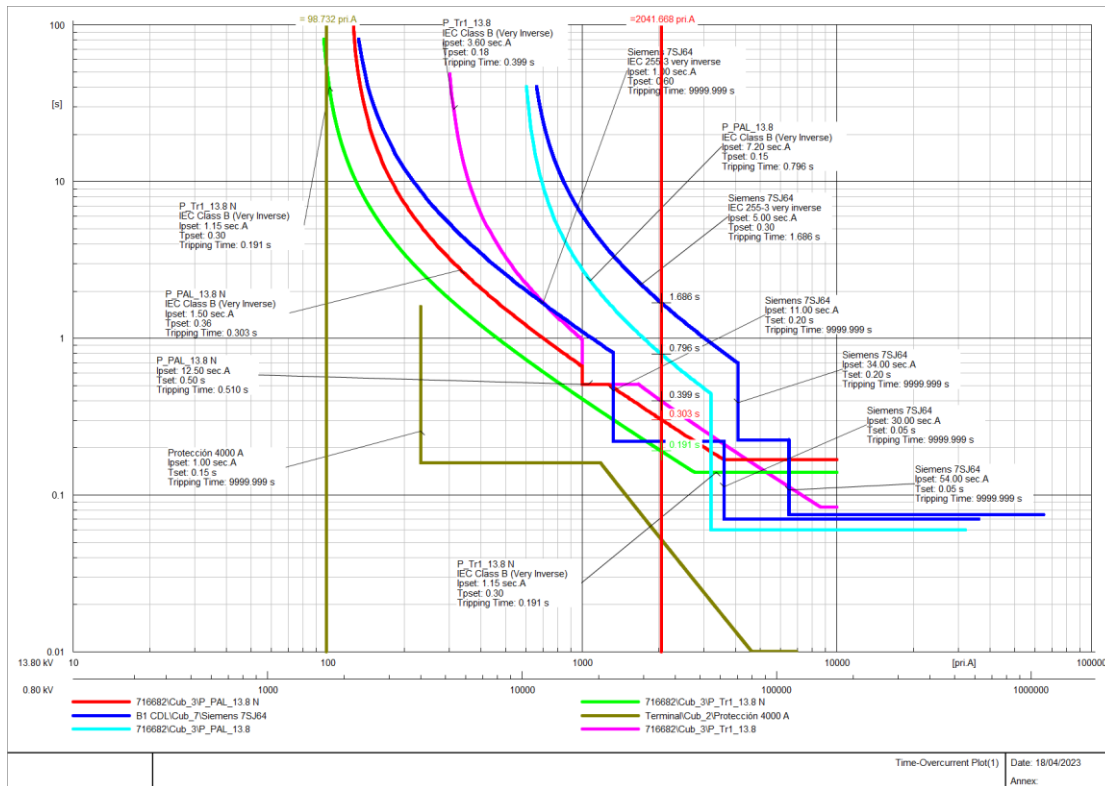


Figura 30. Falla monofásica en baja tensión.

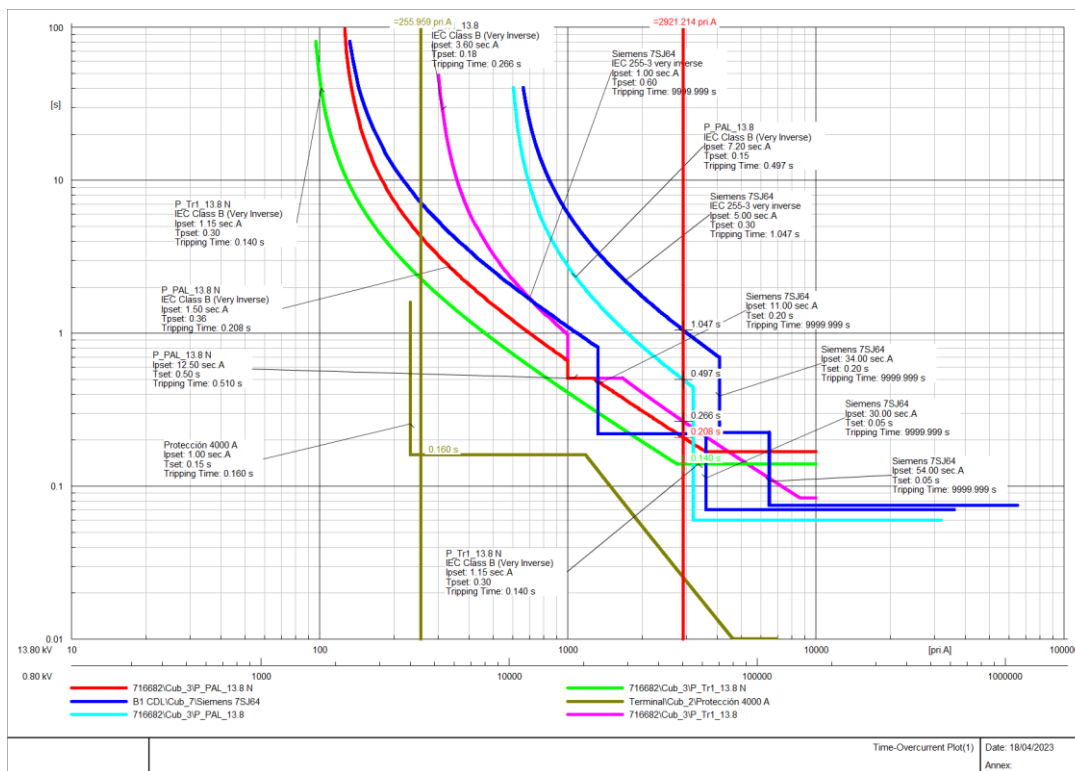


Figura 31. Falla trifásica en baja tensión.

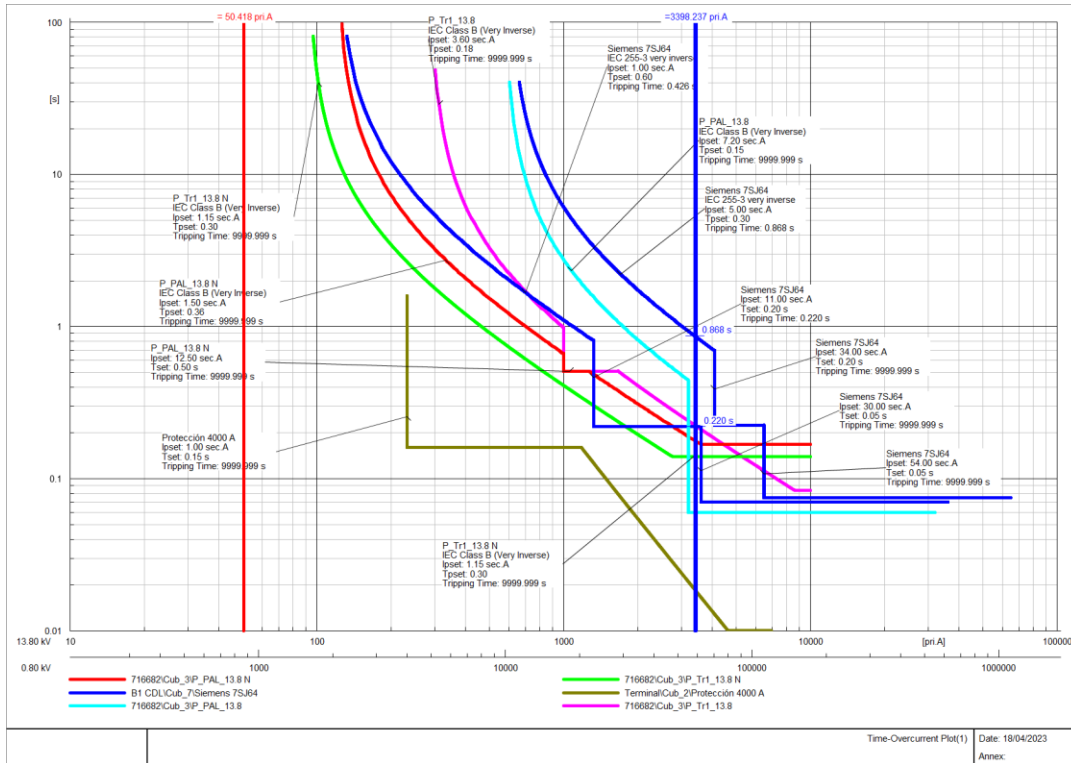


Figura 32. Falla monofásica en media tensión.

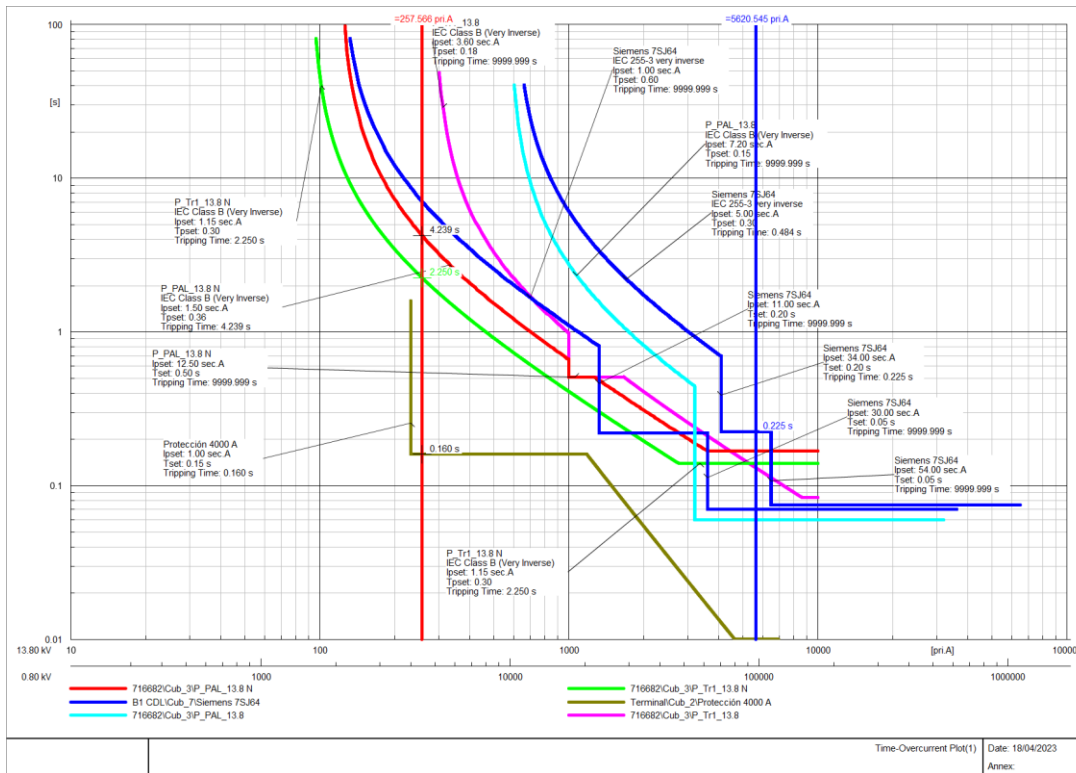


Figura 33. Falla trifásica en media tensión.

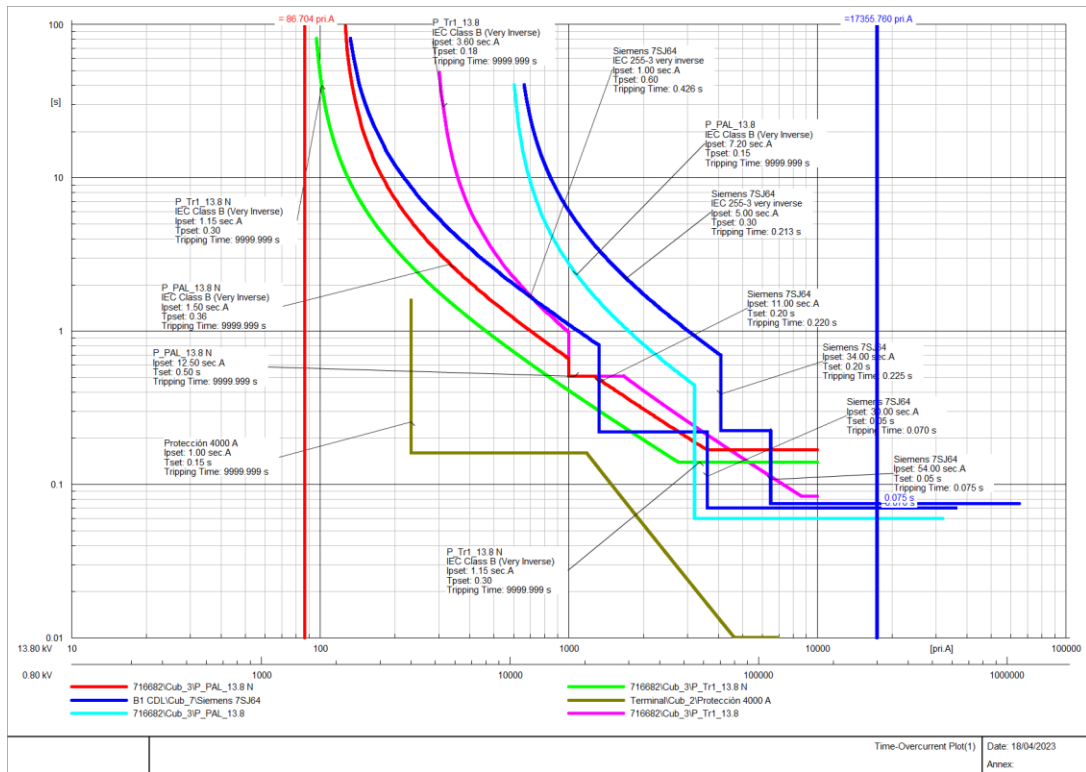


Figura 34. Falla monofásica en cabecera.

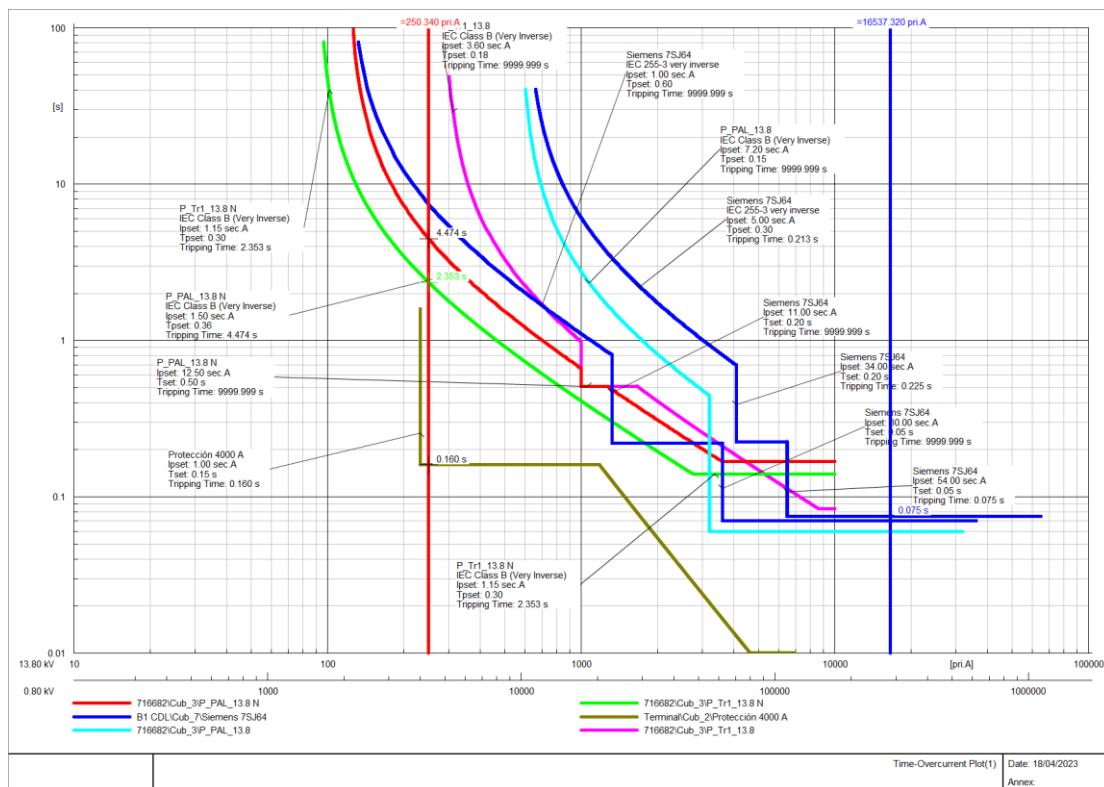


Figura 35. Falla trifásica en cabecera.

Se observa el resultado de la coordinación de protecciones para la falla en baja tensión tanto monofásica como trifásica (siendo la trifásica la situación menos favorable para el sistema), en ambos casos la protección totalizadora (4000 [A]) de los inversores es la primera en disparar, seguida de las protecciones de media tensión, el máximo valor de tiempo observado para el disparo de las protecciones en la localización del proyecto fue de 0,268 [s], en la simulación para el caso de la cabecera del circuito de Cementos y Concretos del Atlántico se marca un valor de 1,435 [s], por lo tanto existe 1,167 [s] de diferencia, tiempo suficiente para que la cabecera no detecte la falla en baja tensión y el circuito siga operando exitosamente; ninguna de las demás etapas del relé de cabecera se vieron afectadas para el caso de la falla mencionada, existe entonces coordinación de las protecciones analizadas para el proyecto. Ahora bien, para el corto monofásico y trifásico en media tensión, las protecciones asociadas a la cabecera del circuito actúan para proteger el sistema, además de que las protecciones de los inversores actúan para evitar el funcionamiento en modo isla, aislando de la red eléctrica, aguas arriba del sistema las protecciones se comportan de manera adecuada protegiendo el circuito de Cementos y Concretos del Atlántico. Finalmente, para el caso de corto monofásico y trifásico realizado justo en la cabecera del circuito, cercano a la subestación Cordialidad 13,8 [kV], como es de esperarse, las protecciones que disparan son las de la cabecera, controlando ambos escenarios y manteniendo los activos del sistema bajo protección ante este tipo de eventualidades.

Gracias al estudio eléctrico riguroso del proyecto se logró demostrar la factibilidad de la conexión de ULTRACEM y las ventajas que puede traer al circuito existente de Air-E.

Visita a proyectos de almacenes SAO Olímpica:

Con el fin de legalizar la instalación solar fotovoltaica ante el respectivo OR, se realizó visita a los almacenes de SAO Olímpica en Villa Carolina, Barranquilla. El objetivo de la visita técnica era recolectar la información necesaria para realizar los respectivos estudios eléctricos y demostrar la viabilidad del proyecto solar, que ya se encontraba con todas las conexiones de los inversores y paneles solares, pero requería de estudios de flujo de carga, cortocircuito y protecciones eléctricas. Como el objetivo era ubicar las protecciones exigidas por la normativa se procedió a analizar y medir los espacios donde se ubica el proyecto con el fin de analizar la disponibilidad física en la zona de los inversores y la subestación eléctrica.



Figura 36. Vista inversores del proyecto.



Figura 37. Inversores en detalle.



Figura 38. Gabinetes en subestación y protecciones inversores.

En la Figura 38 se observa la llegada de los inversores a la subestación, en el gabinete mostrado se encuentran las protecciones de baja tensión que existen por parte de SAO Olímpica. La zona demarcada en el piso de la subestación existe con el fin de cumplir con el espacio de seguridad reglamentado en el RETIE. Se observó la necesidad de reubicar los equipos para poder ubicar las protecciones en media tensión del proyecto, incluyendo un relé para realizar disparo tripolar transferido en caso de fallas.



Figura 39. Vista frontal gabinete protecciones inversores y barraje.



Figura 40. Espacio disponible para los nuevos equipos.

Se realizó la propuesta de la zona marcada en la Figura 40 para la ubicación de los nuevos elementos necesarios con el fin de realizar la legalización del proyecto, consiste en mover el gabinete de los inversores a la nueva posición y utilizar el espacio restante para ubicar los nuevos equipos. El espacio se considera suficiente y la subestación cuenta con dimensiones necesarias para realizar este procedimiento y delimitar nuevas zonas de seguridad establecidas por la norma.



Figura 41. Gabinetes en subestación celdas de protección y remonte.

En la subestación también se observaron las celdas de la Figura 41, correspondiente a la protección del transformador de distribución, donde se ubica el disparo tripolar del sistema en caso de detectarse algún tipo de falla, los elementos de protección deben actuar en conjunto y con una adecuada coordinación para evitar que fallas en el sistema solar fotovoltaico afecten la continuidad del suministro energético. Posterior a la realización de la visita se presentó el informe al cliente sobre las propuestas para los ajustes y ubicación de los elementos necesarios para la legalización del proyecto ante el OR en la ciudad de Barranquilla.

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante la realización de las prácticas académicas en la empresa FLUX S.A.S. se realizaron proyectos de estudios de conexión para su legalización ante los respectivos OR dependiendo de la localización, en general, el enfoque principal en la empresa son los proyectos solares fotovoltaicos, en promoción de la transición energética y diversificación de la huella de carbono. En este informe se resumieron los parámetros más representativos de algunos de los estudios realizados, sin embargo, cada informe presentado a los OR debe cumplir con cierta estructura, mencionando las normas vigentes y su implementación en cada proyecto; en general, se debe cumplir con lo mencionado en la resolución de la CREG 025 de 1995, el código de redes, en conjunto con cada resolución hasta la fecha de hoy y los acuerdos respectivos del CNO, entre ellos se destaca el 1602 por el cual se aprueban los requisitos de protecciones para la conexión de sistemas de generación en el SIN. También, se cumple con lo establecido en el IEEE 1547 (equivalente a la IEC 61727 e IEC 62116) con respecto a la calidad de la potencia (inyección de armónicos a la red eléctrica de cada OR) para que ninguno de los proyectos solares altere la continuidad de la onda de tensión de la red.

Los estudios de conexión realizados en las prácticas académicas demuestran la relevancia e importancia que tiene el diseño y los estudios de conexión de nuevos proyectos de generación y autogeneración, ya sean de baja o alta capacidad instalada. Los ingenieros electricistas deben garantizar la seguridad, viabilidad, calidad y muchísimos más parámetros en las redes de transmisión y distribución, para ello deben verificarse variables importantes y relevantes como la tensión en las barras del sistema, la variación de la frecuencia, los niveles de cortocircuito y la coordinación de protecciones. El SIN debe permanecer estable, ser seguro y confiable, cada estudio permite que estas características no se vean afectadas y que, por el contrario, se refuercen, esto con el fin de que a medida que aumente la demanda energética también aumente la generación de forma responsable, siendo precisos en los estudios y demostrando de forma cuantificable la viabilidad de cada proyecto.

VII. CONCLUSIONES

Para todos los estudios de conexión que se realizaron, según el análisis de flujo de carga en los diferentes escenarios simulados, se puede concluir que los niveles de tensión y cargabilidad no superan los límites establecidos por la norma. En algunos casos, donde se realizaron análisis de proyección a futuro se observaron datos de elementos en sobrecarga; sin embargo, este es un problema de planeación de la expansión, por lo que los proyectos solares se podían conectar de igual manera a la red existente sin afectar el adecuado funcionamiento.

Analizando los diferentes valores obtenidos en las simulaciones de cortocircuito para los proyectos en general, se puede identificar que no existe un cambio significativo en la magnitud de las corrientes de falla y la potencia de cortocircuito con la entrada de los sistemas solares fotovoltaicos, lo anterior cobra sentido al establecer que los inversores se comportan como una fuente de corriente controlada por tensión, lo que implica que al producirse alguna falla el sistema de electrónica de potencia limita el aporte de corriente de cortocircuito del inversor a valores iguales o inferiores en comparación a los datos nominales (se modela como un equivalente de máquina síncrona para evaluar efectos más extremos). También, en general, los inversores que se utilizan en los proyectos solares cumplen con lo establecido en la norma internacional IEEE 519, por lo que se evita que exista distorsión armónica que afecte la calidad de la potencia.

En los estudios de conexión realizados se logró demostrar que los valores de tensión, cargabilidad, pérdidas y frecuencia cumplen a cabalidad la norma exigida (CREG 025 de 1995). Se manifiesta el compromiso de realizar medidas en campo antes y después de la instalación del proyecto con el fin de validar el cumplimiento de todos los aspectos involucrados en el presente estudio de conexión. Es necesario que, a pesar de realizarse los estudios y demostrar la factibilidad de la conexión del proyecto, al momento de las instalaciones siempre se deben realizar medidas en campo para confirmar los cálculos teóricos y las simulaciones realizadas además de que el promotor debe aceptar ante el OR las condiciones en las cuales el proyecto fotovoltaico deberá desconectarse para evitar cualquier falla en el suministro energético.

REFERENCIAS

- [1] «2050—An Energetic Odyssey_ Understanding ‘Techniques of Futuring’ in the transition towards renewable energy| Elsevier Enhanced Reader». <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2214629618300732?token=366ED7503EF5DC12858DF5FFCD1660B74127C0B5FC23DA16CEA6782E8C18A0A1330960A3A2440A35F8FFECE36F07C349&originRegion=us-east-1&originCreation=20230421184506> (accedido 21 de abril de 2023).
- [2] A. R. López *et al.*, «Solar PV generation in Colombia - A qualitative and quantitative approach to analyze the potential of solar energy market», *Renewable Energy*, vol. 148, pp. 1266-1279, abr. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.10.066.
- [3] S. M. Rahman *et al.*, «Electricity Generation in Saudi Arabia: Tracing Opportunities and Challenges to Reducing Greenhouse Gas Emissions», *IEEE Access*, vol. 9, pp. 116163-116182, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3105378.
- [4] W. L. Ahlgren, «The Dual-Fuel Strategy: An Energy Transition Plan», *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, n.º 11, pp. 3001-3052, nov. 2012, doi: 10.1109/JPROC.2012.2192469.
- [5] J. W. Plastow, «Energy services for an electricity industry based on renewable energy», *Power Engineering Journal*, vol. 15, n.º 5, pp. 239-247, oct. 2001, doi: 10.1049/pe:20010506.
- [6] R. J. Hyndman y S. Fan, «Density Forecasting for Long-Term Peak Electricity Demand», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, n.º 2, pp. 1142-1153, may 2010, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2036017.
- [7] A. Pardo y G. Monti, «Quality of electricity supply in Uruguay: Voltage quality overall regulation and its control experience», en *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, jun. 2013, pp. 1-4. doi: 10.1049/cp.2013.0536.
- [8] P. Denholm *et al.*, «Bright Future: Solar Power as a Major Contributor to the U.S. Grid», *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 11, n.º 2, pp. 22-32, mar. 2013, doi: 10.1109/MPE.2012.2234404.
- [9] «Plan de Expansión de Referencia Generación Transmisión 2015 - 2029». <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Plan-Expansion-2015-2029.aspx> (accedido 1 de mayo de 2023).