

Estudio del impacto de la inyección de energía de un generador fotovoltaico en el perfil de tensión y las pérdidas de energía en conductores de la red de baja tensión del edificio de

Ingeniería Eléctrica a partir de simulaciones computacionales

Carlos Andrés Cortés Cancelado; Yuly Fernanda García Pinzón

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero electricista

Director

German Alfonso Osma Pinto

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones

Bucaramanga

2018

Tabla de Contenido

| | |
|---|----|
| Introducción | 15 |
| 1. Marco de referencia | 17 |
| 1.1 Generación Distribuida | 17 |
| 1.2 Marco regulatorio de la Generación Distribuida y Autogeneración en Colombia | 18 |
| 1.3 Edificio de Ingeniería Eléctrica | 19 |
| 1.3.1 Sistema fotovoltaico del Edificio..... | 20 |
| 1.3.2 Características de los paneles FV | 20 |
| 1.3.3 Configuración de los arreglos del SFV | 21 |
| 2. Modelado de cargas eléctricas del edificio de ingeniería eléctrica..... | 24 |
| 2.1 Información de cargas existentes en el edificio de ingeniería eléctrica..... | 24 |
| 2.2 Modelos de cargas listadas..... | 25 |
| 2.2.1 Modelo exponencial..... | 26 |
| 2.2.2 Modelo polinomial (modelo zip)..... | 27 |
| 2.3 Selección de los modelos para cargas listadas | 28 |
| 3. Modelado de la red eléctrica del edificio en PowerFactory..... | 31 |
| 3.1 Elementos de la red de baja tensión en PowerFactory..... | 32 |
| 3.2 Configuración de los elementos..... | 32 |
| 3.2.1 Configuración del transformador..... | 33 |
| 3.2.2 Configuración de los barrajes..... | 35 |
| 3.2.3 Configuración de los conductores..... | 38 |

| | |
|---|----|
| IMPACTO AL INYECTAR ENERGÍA FV EN UNA RED DE BT | 5 |
| 3.2.4 Configuración de las cargas. | 41 |
| 3.2.5 Configuración del sistema fotovoltaico. | 44 |
| 3.2.6 Configuración de la red externa. | 46 |
| 3.3 Diagrama unifilar de la red de BT en PowerFactory | 48 |
| 4. Simulación del comportamiento de la red eléctrica de BT sin generación FV y para diversos escenarios de generación FV. | 51 |
| 4.1 Definición de los escenarios de simulación para el modelado de demanda. | 51 |
| 4.2 Definición de los escenarios de simulación para la inyección de energía fv | 52 |
| 4.3 Configuración de escenarios para cargas en la herramienta simulación cuasi-dinámica | 54 |
| 4.4 Configuración de escenarios para sistemas fotovoltaicos en la herramienta simulación cuasi-dinámica | 58 |
| 4.5 Configuraciones para realizar el cálculo de flujo de carga | 59 |
| 5. Cuantificación de la variación potencial de los parámetros de caracterización del perfil de tensión y pérdidas de energía en los conductores | 63 |
| 5.1 Obtención de datos..... | 63 |
| 5.2 Indicadores de evaluación..... | 64 |
| 5.2.1 Indicador para el perfil de tensiones. | 64 |
| 5.2.2 Indicador de pérdidas de potencia..... | 64 |
| 5.2.3 Indicador de pérdidas de energía. | 65 |
| 5.3 Perfil de tensión | 66 |
| 5.4 Pérdidas en conductores..... | 81 |
| 6. Conclusiones | 87 |

Referencias bibliográficas..... 89

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Edificio de Ingeniería Eléctrica. | 20 |
| Figura 2. SFV1 y SFV2 del Edificio de Ingeniería Eléctrica. | 22 |
| Figura 3. Seguidos solar del Edificio de Ingeniería Eléctrica. | 22 |
| Figura 4. Configuración del sistema SFV_18_1 | 23 |
| Figura 5. Configuración del sistema SFV_18_2. | 23 |
| Figura 6. Ficha técnica del transformador del Edificio de Ingeniería Eléctrica. | 33 |
| Figura 7. Ventana gráfica de PowerFactory con elemento transformador resaltado. | 34 |
| Figura 8. Ventana de configuración datos básicos para transformador. | 35 |
| Figura 9. Ventana de asignación de datos básicos para nuevo tipo de proyecto elemento transformador. | 35 |
| Figura 10. Ventana gráfica de PowerFactory con elemento barraje resaltado. | 37 |
| Figura 11. Ventana de configuración datos básicos para elemento barraje. | 37 |
| Figura 12. Ventana de asignación de datos básicos para nuevo tipo de proyecto elemento barraje. | 38 |
| Figura 13. Ventana de asignación corriente de cortocircuito para nuevo tipo de proyecto elemento barraje. | 38 |
| Figura 14. Ventana gráfica de PowerFactory con elemento línea/conductor resaltado. | 40 |
| Figura 15. Ventana de configuración datos básicos para elemento línea/conductor. | 40 |
| Figura 16. Ventana de asignación de datos básicos para nuevo tipo de proyecto elemento línea/conductor. | 41 |
| Figura 17. Ventana gráfica de PowerFactory con elemento carga resaltado. | 42 |
| Figura 18. Ventana de configuración datos básicos para elemento carga. | 42 |

| | |
|--|----|
| Figura 19. Ventana de configuración en flujo de carga para elemento carga. | 43 |
| Figura 20. Ventana de asignación de datos básicos para nuevo tipo de proyecto elemento carga. | 43 |
| Figura 21. Ventana de asignación en flujo de carga para nuevo tipo de proyecto elemento carga. | 44 |
| Figura 22. Ventana gráfica de PowerFactory con elemento sistema PV resaltado..... | 44 |
| Figura 23. Ventana de configuración datos básicos para elemento sistema PV. | 45 |
| Figura 24. Ventana de asignación de datos básicos para nuevo tipo de proyecto elemento sistema PV. | 46 |
| Figura 25. Ventana gráfica de PowerFactory con elemento sistema PV resaltado..... | 47 |
| Figura 26. Ventana de configuración flujo de carga para elemento red externa..... | 47 |
| Figura 27. Ventana de configuración descripción en la opción coordenadas gráficas para elemento red externa. | 48 |
| Figura 28. Diagrama unifilar de la red eléctrica del Edificio de Ingeniería Eléctrica..... | 49 |
| Figura 29. Diagrama unifilar de la red eléctrica del Edificio de Ingeniería Eléctrica en PowerFactory. | 50 |
| Figura 30. Representación de los SFV en PowerFactory para una capacidad instalada de 10kW de generación FV. | 54 |
| Figura 31. Agregar característica de tiempo del Proyecto para una carga. | 54 |
| Figura 32. Configuración de la característica de tiempo para la carga TIE. | 55 |
| Figura 33. Archivo SemanaTIE.csv para el tablero de iluminación de emergencia. | 55 |
| Figura 34. Resultado de característica de tiempo para la carga TIE del ramal 1. | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 35. Curvas de modelado de demanda para el barraje general de baja tensión en una semana Tipo 1..... | 56 |
| Figura 36. Curvas de modelado de demanda para el barraje de transferencia en una semana Tipo 1..... | 57 |
| Figura 37. Configuración para evento de carga. | 58 |
| Figura 38. Configuración de características para radiación solar y temperatura ambiente en los paneles..... | 59 |
| Figura 39. Ajustes del flujo de carga. | 60 |
| Figura 40. Ajustes del cálculo de Flujo de carga. | 61 |
| Figura 41. Ajustes de máximo error en el flujo de carga. | 61 |
| Figura 42. Diagrama de flujo de la metodología para programar una simulación cuasi-dinámica en PowerFactory. | 62 |
| Figura 43. Perfil de tensión Línea-Neutro [V] en el TDP4..... | 67 |
| Figura 44. Porcentaje de impacto en el perfil de tensión del escenario CFCC..... | 69 |
| Figura 45. Porcentaje de impacto en el perfil de tensión del escenario CFSC. | 70 |
| Figura 46. Porcentaje de impacto en el perfil de tensión del escenario SFCC. | 70 |
| Figura 47. Tensión Línea- neutro, fase A para el barraje TDP4. | 72 |
| Figura 48. Tensión Línea- neutro, fase B para el barraje TDP4. | 72 |
| Figura 49. Tensión Línea- neutro, fase C para el barraje TDP4. | 73 |
| Figura 50. Indicador de variación, Fase A para el barraje TDP4..... | 74 |
| Figura 51. Indicador de variación, Fase B para el barraje TP4..... | 75 |
| Figura 52. Indicador de variación, Fase C para el barraje TDP4..... | 75 |

| | |
|---|----|
| Figura 53. Máximos porcentajes de variación ante diferentes escenarios de capacidad instalada de energía FV..... | 76 |
| Figura 54. Máximo porcentaje de variación de tensión en la Fase A para diferentes escenarios de capacidad instalada de generación FV..... | 77 |
| Figura 55. Máximo porcentaje de variación de tensión en la Fase B para diferentes escenarios de capacidad instalada de generación FV..... | 78 |
| Figura 56. Máximo porcentaje de variación de tensión en la Fase C para diferentes escenarios de capacidad instalada de generación FV..... | 78 |
| Figura 57. Comportamiento de la tensión ante diversas irradiancias y capacidades instaladas de generación FV..... | 79 |
| Figura 58. Impacto en los tableros de la red de BT al inyectar generación FV, con capacidad instalada de 10kW y tensión de la fase A..... | 80 |
| Figura 59. Pérdidas de energía activa del SFV durante el año 2018..... | 82 |
| Figura 60. Pérdidas de energía activa para la línea BGBT-TDP4..... | 83 |
| Figura 61. Pérdidas de energía activa para la línea lado de baja del trafo-BGBT..... | 84 |
| Figura 62. Perdidas de energía activa para las líneas de la red de BT de Edificio..... | 85 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Características de paneles fotovoltaicos instalados en el Edificio de Ingeniería Eléctrica. | 21 |
| Tabla 2. Modelos encontrados en la literatura con su respectiva carga. | 28 |
| Tabla 3. Coeficientes del modelo ZIP a utilizar..... | 30 |
| Tabla 4. Características del transformador del Edificio de Ingeniería Eléctrica..... | 34 |
| Tabla 5. Barrajes del Edificio de Ingeniería Eléctrica | 36 |
| Tabla 6. Conductores que conforman la red Eléctrica del Edificio de Ingeniería Eléctrica | 39 |
| Tabla 7. Fechas que conforman cada tipo de semana con sus respectivas actividades..... | 52 |
| Tabla 8. Número de paneles según la capacidad instalada y el arreglo del SFV..... | 53 |
| Tabla 9. Tensión mínima y máxima en el TDP4. | 73 |
| Tabla 10. Valores de potencia y pérdidas activas del SFV en el año 2018..... | 82 |
| Tabla 11. Valores de pérdidas totales de la red y porcentaje de variación para el 2018..... | 85 |

Lista de Apéndices

(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)

Apéndice A. Inventario de cargas del Edificio de Ingeniería Eléctrica

Apéndice B. Páginas Web para observar las respectivas características eléctricas de las carga

Apéndice C. Descripción de las cargas de la red de BT del Edificio de Ingeniería Eléctrica

Apéndice D. Datos de Radiación Solar

Apéndice E. Registro Semana 1 TALU

Apéndice F. Registro Datos TN

Apéndice G. Datos TR

Apéndice H. Registro TIE

Apéndice I. Registro TAA1Y2

Apéndice J. Registro UPS

Apéndice K. Programa de Simulación LV E3T System_2018

Resumen

Título: Estudio del impacto de la inyección de energía de un generador fotovoltaico en el perfil de tensión y las pérdidas de energía en conductores de la red de baja tensión del edificio de ingeniería eléctrica a partir de simulaciones computacionales.*

Autores: Carlos Andrés Cortés Cancelado, Yuly Fernanda García Pinzón**

Palabras clave: Diagrama unifilar, simulaciones, PowerFactory, irradiación solar, paneles solares.

Descripción

Este trabajo de grado se enmarca en el estudio de la variación de parámetros como perfil de tensión y pérdidas de energía en conductores, los cuales se ven afectados por la inyección de energía de un generador fotovoltaico a la red de baja tensión del Edificio de Ingeniería Eléctrica. Como caso de estudio se modeló la red de baja tensión del Edificio de Ingeniería Eléctrica utilizando el software computacional PowerFactory de DIGSILENT que permite analizar el impacto producido por la inyección de energía de un sistema fotovoltaico para diversos valores de capacidad instalada (5 kW, 10 kW, 20 kW y 25 kW). Se construyó este diagrama unifilar realizando un inventario a partir de inspecciones de recintos e información disponible del Edificio de los elementos que conforman la red eléctrica de BT (conductores, transformador, barrajes, cargas, red externa y SFV), una vez modelada la red se realizó la simulación de flujo de carga de la red eléctrica para un periodo de un año (día a día) integrando la generación de energía FV. Para esto, se utilizó la herramienta *simulación cuasi-dinámica* de PowerFactory. De los resultados obtenidos se puede inferir que el impacto en el perfil de tensión y pérdidas de energía incrementan cuando se aumenta la capacidad instalada de generación FV.

* Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: German Alfonso Osma Pinto, Doctor en Ingeniería Eléctrica.

Abstract

Title: Study of the impact of the injection of energy of a photovoltaic generator on the voltage profile and the energy losses in conductors of the low voltage network of the electrical engineering building from computer simulations.*

Authors: Carlos Andrés Cortés Cancelado, Yuly Fernanda García Pinzón**

Keywords: Single line diagram, simulations, PowerFactory, solar irradiation, solar panels.

Description:

This degree work is part of the study of the variation of parameters such as voltage profile and energy losses in conductors, which are affected by the injection of energy from a photovoltaic generator to the low voltage network of the Electrical Engineering Building . As a case study, the low voltage network of the Electrical Engineering Building was modeled using the PowerFactory software from DIgSILENT that allows analyzing the impact produced by the injection of energy from a photovoltaic system for various values of installed capacity (5 kW, 10 kW , 20 kW and 25 kW). This single-line diagram was constructed, making an inventory based on inspections of enclosures and information available from the Building of the elements that make up the LV electrical network (conductors, transformer, busbars, loads, external network and SPV), once the network has been modeled Simulated the load flow of the electric network for a period of one year (day to day) integrating the generation of PV power. For this, the PowerFactory quasi-dynamic simulation tool was used. From the results obtained, it can be inferred that the impact on the voltage and energy loss profile increases when the installed capacity of PV generation is increased.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: German Alfonso Osma Pinto, Doctor en Ingeniería Eléctrica.

Introducción

El uso de sistemas fotovoltaicos conectados a la red de baja tensión - BT es cada vez más usual, esta opción es llamativa dado que es energía “amigable” con el medio ambiente, requiere bajo mantenimiento y cuenta con versatilidad de generación, desde los W hasta MW (Hernández, 2012).

En el acuerdo de Paris de 2015 sobre el cambio climático, Colombia se comprometió a reducir un 20% las emisiones de gases contaminantes a 2030. Para cumplir con esta meta, el gobierno nacional y sus entidades conexas emitieron recientemente el marco legal y reglamentario que promueve el uso de fuentes no convencionales de energía (Gacía Arbelaéz, Vallejo, Higgins, & Escobar, 2016). En 2014, el Congreso de la República expidió la Ley 1715 con el objetivo de promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable. La reglamentación de esta ley se delegó a entidades como la Unidad de Planeación Minero Energética – UPME y la Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG, esta última expidió recientemente la Resolución CREG 030 de 2018, la cual tiene por objeto regular las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional.

Con la integración de energía fotovoltaica - FV a una red de baja tensión, es posible que la red eléctrica experimente condiciones no deseadas en su comportamiento (González, Maritza; Ortiz, 2016), tales como cambios en el perfil de tensión, calidad de la energía, niveles de cortocircuito, nivel de cargabilidad de conductores, pérdidas en conductores, etc. Por tal motivo es importante estudiar los aspectos técnicos de un sistema de baja tensión (Buitrago Arroyave & López Lezama, 2013; Hernández, 2012).

Recientemente, en el Edificio de Ingeniería Eléctrica ubicado en la Universidad Industrial de Santander, se realizó la instalación de un sistema de generación fotovoltaico compuesto por 37 paneles solares, con una capacidad de inyección de potencia de cerca de 10 kW pico. Dicho sistema hace parte de un conjunto de aplicaciones de ahorro energético que permiten considerar la edificación como un laboratorio vivo en temáticas de construcción sostenible y eficiencia energética (Osma Pinto & Ordoñez, 2013).

Teniendo en cuenta lo anterior y considerando la actual coyuntura en materia de regulación, resulta atractivo realizar un estudio que permita analizar los potenciales impactos de la inyección fotovoltaica en una red de baja tensión como la del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

Este trabajo de grado tiene como objetivo estudiar los potenciales impactos en el perfil de tensión y las pérdidas en conductores de la red eléctrica de BT del Edificio de Ingeniería Eléctrica, considerando la inyección de energía fotovoltaica. Tal estudio se llevó a cabo a partir de la construcción de un modelo de la red de BT y ejecución de simulaciones ante diversos escenarios de generación FV en el programa PowerFactory de la empresa alemana DIgSILENT.

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende los siguientes objetivos específicos:

- Seleccionar los modelos para representar las cargas eléctricas del Edificio de Ingeniería Eléctrica a partir de la revisión de publicaciones científicas.
- Modelar la red de baja tensión del Edificio de Ingeniería Eléctrica y el sistema de generación FV en el programa PowerFactory.
- Simular el comportamiento de la red eléctrica de BT sin generación FV y para diversos escenarios de generación FV.

- Cuantificar la variación potencial de los parámetros de caracterización del perfil de tensión y pérdidas de energía en los conductores de la red de BT del Edificio de Ingeniería Eléctrica debido a la inyección de energía por un generador FV.

1. Marco de referencia

Este capítulo contiene una revisión de bibliográfica sobre generación distribuida y el marco regulatorio asociado, además una breve descripción del Edificio de Ingeniería Eléctrica y su sistema de generación fotovoltaica.

1.1 Generación Distribuida

En la actualidad, el mercado energético se enfrenta a una inminente reestructuración en el ámbito de generación eléctrica, puesto que se está incorporando la Generación Distribuida -GD como opción para mejorar la seguridad en el suministro de energía (Buitrago Arroyave & López Lezama, 2013), ésta se define como la producción de energía eléctrica cerca de los centros de consumo, conectada a un Sistema de Distribución Local - SDL (Fallis, 2013). En la GD participan unidades que utilizan recursos renovables, como las eólicas, solar fotovoltaica, generación con biomasa y pequeñas centrales hidráulicas, también las unidades que utilizan recursos no renovables como motores de combustión interna, turbinas a gas, microturbinas y celdas de combustible (Buitrago Arroyave & López Lezama, 2013).

Se ha profundizado el estudio de GD ya que se evidencia un aumento en la implementación de energía solar fotovoltaica a causa del avance de las tecnologías. Este tipo de generación no es permanente, debido a que la irradiación solar no es constante en todo momento, tal variación supone impactos técnicos en la red eléctrica tales como cambios de comportamiento en el perfil de tensiones y las pérdidas en conductores (Buitrago Arroyave & López Lezama, 2013).

1.2 Marco regulatorio de la Generación Distribuida y Autogeneración en Colombia

En Colombia se denomina Autogeneración - AG como aquella actividad realizada por personas naturales o jurídicas que producen energía eléctrica principalmente, para atender sus propias necesidades (Fallis, 2013) y generador distribuido – GD a una persona jurídica que genera energía eléctrica cerca de los centros de consumo, y está conectado al sistema de Distribución Local y con potencia instalada menor o igual a 0,1 MW (CREG, 2015). Debido a la definición global encontrada en la literatura (Buitrago Arroyave & López Lezama, 2013; Hernández, 2012) de GD se define que este tipo de generación AG, también es catalogada como GD.

La Ley 1715 de 2014 (Fallis, 2013), por la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, y la Resolución CREG 030 de 2018, por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional, brindan el escenario legal y regulatorio que deben cumplir los interesados en generación con fuentes no convencionales de energía renovables. Algunos aspectos de relevancia para GD y AG son los siguientes:

- Se deben cumplir todos los requerimientos mencionados en la Resolución CREG 030 de 2018 por parte de los interesados en generar energía y por parte del OR para permitir la conexión de estos.
- Se debe seguir los lineamientos que corresponden a lo definido en esta Ley 1715 de 2014 y las leyes 142 y 143 de 1994.
- Se debe atender a los parámetros que definan la CREG (*Comisión Reguladora de Energía y Gas*), la UPME (*Unidad de Planeación Minero-Energética*), y el Ministerio de Minas y Energía de Colombia.

- Para autogeneración establece que en el evento que se generen excedentes de energía eléctrica a partir de la actividad, éstos podrán entregarse a la red eléctrica, en los términos que establezca la CREG para tal fin.
- La capacidad de la generación distribuida se definirá en función de la capacidad del sistema en donde se va a conectar, según los términos del Código de Conexión y las demás disposiciones que la CREG defina para tal fin.

1.3 Edificio de Ingeniería Eléctrica

El Edificio de Ingeniería Eléctrica, mostrado en la Figura 1, está ubicado en la Universidad Industrial de Santander. Este fue objeto de una reforma estructural que permitió la inclusión de algunas estrategias de ahorro energético tales como iluminación natural, ventilación natural y techo verde. Entre 2015 y 2017, se instaló en la edificación un sistema de generación fotovoltaico. Lo anterior, ha permitido el desarrollo de varios trabajos de investigación a nivel de pregrado y posgrado, por lo que se considera como un laboratorio vivo.

Las unidades de generación de energía fotovoltaica se encuentran ubicadas en las terrazas del edificio, en total se tiene una capacidad instalada de 10 kWp. Actualmente, toda la energía generada es inyectada a la red y ,por lo tanto, consumida en cualquier servicio de la edificación (Osma Pinto & Ordoñez, 2013)



Figura 1. Edificio de Ingeniería Eléctrica. Adaptado de Bautista, M. (s.f.). UIS. Retrieved from <https://review.wizehive.com/voting/view/ieee2017photo/49459/4874019%0D>

1.3.1 Sistema fotovoltaico del Edificio. El sistema fotovoltaico -SFV del Edificio está conformado por 37 paneles de las marcas UP solar, Trina solar y Canadian solar, la disposición de los paneles se realizó en 2 arreglos de 18 paneles cada uno llamados SFV_18_1 y SFV_18_2 y un seguidor solar. La inyección de energía se realiza mediante microinversores M250 de la marca Enphase.

1.3.2 Características de los paneles FV. Dado que los paneles FV son de marcas diferentes sus características como potencia pico, tensión nominal y corriente de cortocircuito, entre otros, varían. En la Tabla 1 se recopilan las principales características de cada modelo de panel FV. Cabe resaltar que el material de estas tres marcas de panel es de silicio policristalino.

Tabla 1.

Características de paneles fotovoltaicos instalados en el Edificio de Ingeniería Eléctrica.

| Marca | Modelo | Potencia pico (MPP) | Tensión nominal (MPP) | Corriente nominal | Tensión de circuito abierto | Corriente de cortocircuito |
|----------------|-------------|------------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Trina Solar | TSM-PD05.08 | 270 W | 30,9 V | 8,73 A | 38,4 V | 9,18 A |
| Up Solar | UP-M255P-B | 255 W | 31,1 V | 8,2 A | 38,4 V | 8,5 A |
| Canadian Solar | CS6P-255 | 255 W | 30,1 V | 8,3 A | 37,2 V | 8,87 A |

1.3.3 Configuración de los arreglos del SFV. La figura 2 muestra los sistemas SFV1 y SFV2 ubicados en el Edificio y la Figura 3 el seguidor solar. El arreglo SFV_18_1 está conformado por 3 paneles de la marca Up Solar, 5 Trina Solar y 10 Canadian Solar; el arreglo denominado SFV_18_2 se conforma con 8 paneles Trina Solar y 10 Canadian Solar, cada arreglo cuenta con un microinversor Enphase M250 asociado a cada panel. Las figuras 4 y 5 muestran el diagrama del sistema SFV_18_1 y SFV_18_2 respectivamente.

El sistema seguidor solar cuenta con 1 panel FV de la marca Canadian Solar. Este se encuentra ubicado en el Piso 5 del Edificio y está conectado a la misma acometida que SFV_18_1 y SFV_18_2. Dicho sistema también cuenta con un micro inversor Enphase M250.



Figura 2. SFV1 y SFV2 del Edificio de Ingeniería Eléctrica.



Figura 3. Seguidos solar del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

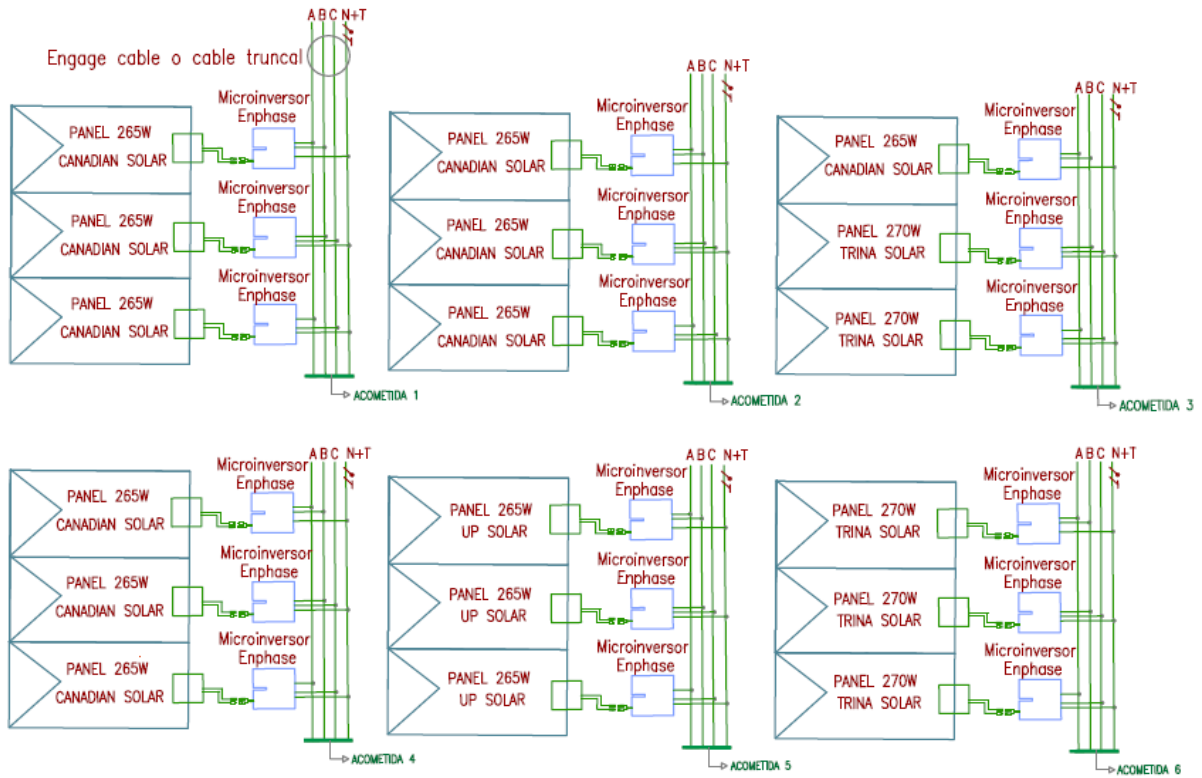


Figura 4. Configuración del sistema SFV_18_1

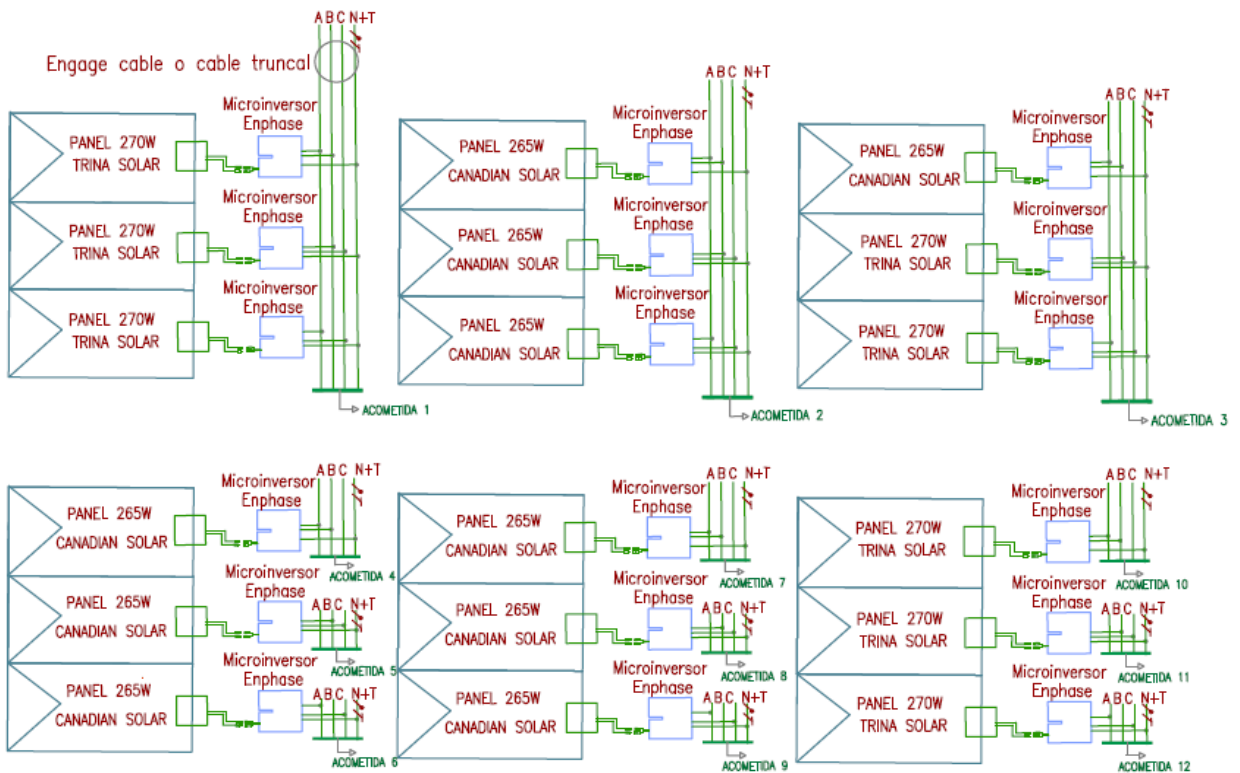


Figura 5. Configuración del sistema SFV_18_2.

2. Modelado de cargas eléctricas del edificio de ingeniería eléctrica

La carga eléctrica se define como todo artefacto, equipo o instalación, cuyo mecanismo de operación requiera del consumo de energía eléctrica para su funcionamiento (Quezada, 2013). Las edificaciones cuentan con un amplio inventario de cargas debido a las necesidades que éstas deben suplir. Esta sección presenta el inventario de cargas del Edificio de Ingeniería Eléctrica y los modelos matemáticos que las representan. Esta información es requerida como insumo para el modelado de la red de BT del Edificio en PowerFactory.

2.1 Información de cargas existentes en el edificio de ingeniería eléctrica

Se realizó un inventario de cargas existentes en el Edificio (ver Apéndice A) a partir de la inspección de los recintos y la consulta de la información disponible (planos y documentación técnica) (Anaya, Gabriel ; Avellaneda & Cárdenas, 2013; Arévalo, Mantilla, & Sáchica, 2013; Del & Ingenierías, 2012; Figueroa, 2015; Otero, Jorge; Pedrozo, 2015), que permitió recopilar características de interés como potencia nominal, cantidad de elementos y ubicación. Las características eléctricas de cada elemento se encuentran con mayor detalle en el Apéndice B.

Con base en los datos mostrados en la Tabla A.1, se catalogan como cargas representativas aquellos elementos con potencias iguales o superiores a 20 W, dado que por debajo de esta potencia solo hay elementos que funcionan en corriente continua o alimentados por medio de PowerPacks, partiendo de esto, se listan los tipos de cargas que se implementaron en el programa de simulación.

- Luminarias fluorescentes
- Aires acondicionados
- Equipos de cómputo

- Impresoras
- Proyectores
- Nevera y refrigerador industrial
- Cafeteras
- Horno microondas
- Televisor
- Extractores
- Ventilador
- UPS

2.2 Modelos de cargas listadas

Un aspecto importante en el modelado de una red de baja tensión en PowerFactory consiste en la representación de las cargas a través de un modelo matemático. Esto permite reflejar la potencia activa y la potencia reactiva consumida por los elementos de carga en relación con variables como la tensión de la barra donde se encuentra conectada la carga y la frecuencia de la red (Quezada, 2013).

Los modelos de carga se pueden clasificar por sus características estáticas o dinámicas y son tomados de acuerdo con el tipo de estudio que se desea realizar. En cuanto a modelos de carga estáticos se utilizan ecuaciones algebraicas y tiene una complejidad menor al momento de representar distintos tipos de cargas, a diferencia de los modelos dinámicos utilizan ecuaciones diferenciales y se utilizan para casos más específicos de cargas (Quezada, 2013).

El objetivo principal de los modelos estáticos es expresar la potencia activa y reactiva para cualquier instante de tiempo como una función de la tensión y la frecuencia (Chimborazo, 2010). Típicamente se utilizan dos enfoques: modelo polinomial y modelo exponencial.

En cuanto al modelo dinámico la variación de la potencia activa y reactiva consumida por la carga depende de los valores de las tensiones en el tiempo (Quezada, 2013; Rodríguez, Pérez, & Mora, 2013). En este trabajo de grado no se considera este modelado ya que las cargas a modelar no pertenecen a cargas con alto grado de complejidad.

2.2.1 Modelo exponencial. En este modelo la potencia activa y reactiva consumida por la carga ante variaciones de tensión se representa como muestran las expresiones (1) y (2), respectivamente (Rodríguez et al., 2013):

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (2)$$

Donde,

P_0 , Potencia activa nominal a voltaje nominal (W)

Q_0 , Potencia reactiva nominal a voltaje nominal (VAR)

V_0 , tensión nominal (V)

V , tensión actual (V)

α y β son los parámetros de la carga exponencial

Los componentes α y β se cuantifican según el tipo de carga que se esté modelando. Si estos exponentes toman valores de 0, 1 ó 2, corresponden a casos de cargas de tipo potencia constante, corriente constante e impedancia constante, respectivamente (Quezada, 2013).

2.2.2 Modelo polinomial (modelo zip). Este modelo se basa en la relación entre la potencia y la magnitud de tensión mediante una ecuación polinomial y representa la carga como una combinación de una carga de potencia constante, corriente constante e impedancia constante, como se muestra en (3) y (4) (Rodríguez et al., 2013):

$$P = P_0 \left(a_0 + a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right) + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (3)$$

$$Q = Q_0 \left(b_0 + b_1 \left(\frac{V}{V_0} \right) + b_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (4)$$

Donde,

P_0 , Potencia activa nominal a voltaje nominal (W)

Q_0 , Potencia reactiva nominal a voltaje nominal (VAR)

V_0 , tensión nominal (V)

V , tensión actual (V)

a_0, a_1, a_2 , son los coeficientes de potencia, corriente e impedancia, respectivamente.

b_0, b_1, b_2 , son los coeficientes de potencia, corriente e impedancia, respectivamente.

Por otro lado, es posible incluir el efecto de la frecuencia, si se multiplican las expresiones (1), (2), (3) y (4) por la expresión (5) (Chimborazo, 2010):

$$\left(1 + K_f(f - f_0)\right) \quad (5)$$

Donde,

K_f , parámetro de sensibilidad de frecuencia del modelo

f , frecuencia actual (Hz)

f_0 , frecuencia nominal (Hz)

2.3 Selección de los modelos para cargas listadas

El procedimiento para seleccionar cuál es el modelo que puede representar las cargas del Edificio se realizó siguiendo los ítems mencionados a continuación:

- Recopilación de la literatura disponible sobre cargas de tipo comercial en la cual se haga uso de los modelos exponencial y ZIP. Al revisar fuentes de información como IEEE Xplore y Elsevier se encontró variedad de información acerca de los dos modelos, la cual es presentada en la Tabla 2.

Tabla 2.

Modelos encontrados en la literatura con su respectiva carga.

| Tipo de carga | Modelo Exponencial | Modelo polinomial (ZIP) |
|-----------------------------------|---|---|
| Lámparas y balas Fluorescentes | (Aguirre & Xean, 2016; Chimborazo, 2010; Gutiérrez, 2009; Hatipoglu, Kenan; Fidan, Ismail; Radman, 2012; Hatipoglu & Fidan, 2014; Quezada, 2013; Rodríguez et al., 2013) | (Ariza, 2016; Bokhari et al., 2014; Collin, Tsagarakis, Member, & Kiprakis, 2014) |
| Aires acondicionados | (Aguirre & Xean, 2016; Chimborazo, 2010; Gutiérrez, 2009; Hatipoglu, Kenan; Fidan, Ismail; | (Arif et al., 2017; Bokhari et al., 2014; Rios, Agbossou, & Cardenas, 2017) |

| Tipo de carga | Modelo Exponencial | Modelo polinomial (ZIP) |
|---------------------------------|---|--|
| | Radman, 2012; Hatipoglu & Fidan, 2014; Quezada, 2013; Rodríguez et al., 2013) | |
| Equipos de cómputo | (Gutiérrez, 2009) | (Arif et al., 2017; Bokhari et al., 2014; Caetano, Jota, & Gonçalves, 2013; Palm & Schegner, 2016) |
| Impresoras | - | (Bokhari et al., 2014) |
| Proyectores | - | (Bokhari et al., 2014) |
| Nevera y refrigerador comercial | (Gutiérrez, 2009; Rodríguez et al., 2013) | (Arif et al., 2017; Bokhari et al., 2014; Rios et al., 2017) |
| Cafeteras | (Aguirre & Xean, 2016; Gutiérrez, 2009; Hatipoglu, Kenan; Fidan, Ismail; Radman, 2012; Hatipoglu & Fidan, 2014; Rodríguez et al., 2013) | (Bokhari et al., 2014; Palm & Schegner, 2016; Rios et al., 2017) |
| Horno microonda | (Aguirre & Xean, 2016; Gutiérrez, 2009; Hatipoglu, Kenan; Fidan, Ismail; Radman, 2012; Hatipoglu & Fidan, 2014; Rodríguez et al., 2013) | (Arif et al., 2017; Bokhari et al., 2014; Rios et al., 2017) |
| Televisor | (Gutiérrez, 2009; Rodríguez et al., 2013) | (Caetano et al., 2013; Collin, 2013; Rios et al., 2017) |
| Extractores | (Aguirre & Xean, 2016; Chimborazo, 2010; Gutiérrez, 2009; Hatipoglu, Kenan; Fidan, Ismail; Radman, 2012; Hatipoglu & Fidan, 2014) | (Bokhari et al., 2014; Caetano et al., 2013; Palm & Schegner, 2016; Rios et al., 2017) |

| Tipo de carga | Modelo Exponencial | Modelo polinomial (ZIP) |
|---------------|---|--|
| Ventilador | (Aguirre & Xean, 2016; Chimborazo, 2010; Gutiérrez, 2009; Hatipoglu, Kenan; Fidan, Ismail; Radman, 2012; Hatipoglu & Fidan, 2014) | (Bokhari et al., 2014; Caetano et al., 2013; Palm & Schegner, 2016; Rios et al., 2017) |
| UPS | (Aguirre & Xean, 2016) | (Arif et al., 2017) |

- Al revisar la tabla anterior se observa que en el modelo exponencial para impresoras y proyectores no se encontró información representativa, en cambio para el modelo ZIP se abarca la totalidad de cargas a modelar. En cuanto a la configuración de los modelos en PowerFactory, se encontró que la herramienta ya incluye una opción de modelado ZIP en la que solo se deben agregar los coeficientes para la potencia activa y reactiva de cada carga, por lo anterior se optó por el modelo ZIP.
- Para definir los coeficientes del modelo ZIP a utilizar, se tuvo en cuenta la representatividad de las referencias sobre el tema en la biblioteca digital IEEE Xplore, encontrándose que el trabajo (Bokhari et al., 2014) es el más citado, con 48 publicaciones, donde se obtuvo la mayoría de los modelos, también se consideraron los estudios (Arif et al., 2017; Caetano et al., 2013) dado que estos proporcionan los coeficientes restantes para la totalidad de cargas listadas del Edificio, los coeficientes a utilizar se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3.
Coefficientes del modelo ZIP a utilizar.

| Referencia | Tipo de carga | Coefficientes modelo ZIP |
|------------------------|--------------------------|---|
| (Bokhari et al., 2014) | Luminarias fluorescentes | $a_2 = 0,47$ $a_1 = 0,63$ $a_0 = -0,10$ $b_2 = 0,55$ $b_1 = 0,38$ $b_0 = 0,07$ |
| (Bokhari et al., 2014) | Aires acondicionados | $a_2 = 1,17$ $a_1 = -1,83$ $a_0 = 1,66$ $b_2 = 15,68$ $b_1 = -27,15$ $b_0 = 12,47$ |

| Referencia | Tipo de carga | Coefficientes modelo ZIP |
|------------------------|---------------------------------|---|
| (Bokhari et al., 2014) | Equipo de cómputo | $a_2 = 0,20$ $a_1 = -0,30$ $a_0 = 1,10$ $b_2 = 0,00$ $b_1 = 0,60$ $b_0 = 0,40$ |
| (Bokhari et al., 2014) | Impresora | $a_2 = 0,87$ $a_1 = -0,27$ $a_0 = 0,34$ $b_2 = 2,14$ $b_1 = -3,67$ $b_0 = 2,53$ |
| (Bokhari et al., 2014) | Proyectores | $a_2 = 0,23$ $a_1 = -0,52$ $a_0 = 1,29$ $b_2 = 0,24$ $b_1 = -0,17$ $b_0 = 0,93$ |
| (Bokhari et al., 2014) | Nevera y refrigerador comercial | $a_2 = 1,17$ $a_1 = -1,83$ $a_0 = 1,66$ $b_2 = 7,07$ $b_1 = -10,94$ $b_0 = 4,87$ |
| (Bokhari et al., 2014) | Cafeteras | $a_2 = 0,13$ $a_1 = 1,62$ $a_0 = -0,75$ $b_2 = 3,89$ $b_1 = -6,00$ $b_0 = 3,11$ |
| (Bokhari et al., 2014) | Horno microondas | $a_2 = 1,39$ $a_1 = -1,96$ $a_0 = 1,57$ $b_2 = 50,07$ $b_1 = -93,55$ $b_0 = 44,48$ |
| (Caetano et al., 2013) | Televisor | $a_2 = 0,01$ $a_1 = 0,00$ $a_0 = 0,99$ $b_2 = 0,04$ $b_1 = 0,00$ $b_0 = 0,95$ |
| (Bokhari et al., 2014) | Extractores | $a_2 = -0,47$ $a_1 = 1,71$ $a_0 = -0,24$ $b_2 = 2,34$ $b_1 = -3,12$ $b_0 = 1,78$ |
| (Bokhari et al., 2014) | Ventilador | $a_2 = -0,47$ $a_1 = 1,71$ $a_0 = -0,24$ $b_2 = 2,30$ $b_1 = -3,12$ $b_0 = 1,78$ |
| (Arif et al., 2017) | UPS | $a_2 = 3,51$ $a_1 = -3,94$ $a_0 = 1,43$ $b_2 = 5,80$ $b_1 = -7,30$ $b_0 = 2,46$ |

3. Modelado de la red eléctrica del edificio en PowerFactory

Uno de los objetivos del trabajo de grado consiste en realizar el modelado de la red de BT del Edificio de Ingeniería Eléctrica en el programa PowerFactory. Este modelado debe tener en cuenta aspectos característicos de la red como: tipo y distancia de conductores, transformador, barrajes, asignación de fases para cada circuito y, por último, el sistema fotovoltaico. Con el fin de abordar cada detalle de la red, se hizo una revisión minuciosa de la información disponible acerca de la red de BT del Edificio, acompañado de una inspección de los barrajes principales y de piso, lo cual

permitió identificar la asignación de fases para cada circuito, actualizar la información referente a cargas recientemente instaladas e identificar que conductores utilizaron para las mismas.

3.1 Elementos de la red de baja tensión en PowerFactory

PowerFactory permite configurar una red eléctrica de BT haciendo uso de componentes como transformadores, líneas, barrajes, entre otros, que tienen predefinidas sus características eléctricas en el software. Debido al enfoque de este trabajo de grado, fue necesario crear nuevos tipos³ de características para los elementos que conforman la red eléctrica de BT del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

Los elementos con los cuales se realiza el modelo de la red de BT del Edificio son los siguientes:

- Transformador de dos devanados
- Barrajes
- Conductores
- Cargas
- Sistema FV
- Red externa

3.2 Configuración de los elementos

Para la configuración de los elementos que componen la red de BT, se introdujo en el software la información característica de cada uno de los elementos que conforman la red de BT del Edificio.

³ Configuraciones ajustadas a cada uno de los elementos en particular

3.2.1 Configuración del transformador. El transformador del Edificio de Ingeniería Eléctrica fue fabricado por la empresa Alemana SIEMENS, cuenta una capacidad de potencia 630 kVA y un sistema de refrigeración ONAN, su relación de transformación nominal es de 13,2 kV por el lado de alta y 229 V en el lado de baja, su conexión es Dyn5. La Figura 6 presenta la ficha técnica del transformador.

| SIEMENS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------|---------|--|---------|--|---------|-----------------------------------|--|--|-----|--------------------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|---|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---|---|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---|---|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---|---|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---|---|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SIEMENS MANUFACTURING S.A. Protocolo de Pruebas para Transformadores | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Información General Cliente: INGENIERC LTDA Oferta No.: Transformador NUEVO | | | Pedido: 800000108488 Cantidad: 1 Tipo: cFOUR 704-99 s/15 | | | | Diseño: 528E No. Serie: 359103 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fabricante: SIEMENS S.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Especificaciones Técnicas 630 Potencia (kVA) 3 Fases ONAN Refrigeración 60 Frec. (Hz) 15/1.2 Tensión Serie (kV) 95/30 NBA AT/BT (kV) 55 Clase Aislam. 60 Altura Diseño (mm) 1000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Valores Nominales Alta Tensión: 13200 Baja Tensión: 229/132.2 Tensión Serie: 13200 +2/-242.50 Clase Aislam.: 55 Altura Diseño: 27.56 1588.34 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Resultados de Ensayos Temp. amb (°C): 20 Posic. Conmut.: 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1) Líquido Aislante Mineral Referencia: IZAR II Tensión Ruptura (kV): 40 Método: ASTM D-1815 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2) Resistencia de Aislamiento: Tiempo Lectura (min): 5 Tensión Prueba (kV): 5 AT Contra BT y Tierra (MΩ): 26000 BT Contra AT y Tierra (MΩ): 9150 AT Contra BT (MΩ): 37500 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3) Relación de Transformac.: Polaridad: 1 Grupo Conexión: Dyn5 Fase-Fase: Fase-Neutro: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>Pos</th> <th>Tensión Derivación</th> <th>Fase U</th> <th>Fase V</th> <th>Fase W</th> <th>Nominal</th> <th>Mínimo</th> <th>Máximo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>13860</td><td>104,870</td><td>104,890</td><td>104,870</td><td>104,831</td><td>104,307</td><td>105,355</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>13530</td><td>102,370</td><td>102,390</td><td>102,370</td><td>101,823</td><td>102,846</td></tr> <tr><td>3</td><td>3</td><td>13200</td><td>99,865</td><td>99,888</td><td>99,866</td><td>99,340</td><td>100,358</td></tr> <tr><td>4</td><td>4</td><td>12870</td><td>97,365</td><td>97,395</td><td>97,365</td><td>96,856</td><td>97,829</td></tr> <tr><td>5</td><td>5</td><td>12540</td><td>94,870</td><td>94,899</td><td>94,876</td><td>94,373</td><td>95,321</td></tr> </tbody> </table> | | | | | | | | | | Pos | Tensión Derivación | Fase U | Fase V | Fase W | Nominal | Mínimo | Máximo | 1 | 13860 | 104,870 | 104,890 | 104,870 | 104,831 | 104,307 | 105,355 | 2 | 2 | 13530 | 102,370 | 102,390 | 102,370 | 101,823 | 102,846 | 3 | 3 | 13200 | 99,865 | 99,888 | 99,866 | 99,340 | 100,358 | 4 | 4 | 12870 | 97,365 | 97,395 | 97,365 | 96,856 | 97,829 | 5 | 5 | 12540 | 94,870 | 94,899 | 94,876 | 94,373 | 95,321 |
| Pos | Tensión Derivación | Fase U | Fase V | Fase W | Nominal | Mínimo | Máximo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 13860 | 104,870 | 104,890 | 104,870 | 104,831 | 104,307 | 105,355 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 2 | 13530 | 102,370 | 102,390 | 102,370 | 101,823 | 102,846 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 3 | 13200 | 99,865 | 99,888 | 99,866 | 99,340 | 100,358 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 4 | 12870 | 97,365 | 97,395 | 97,365 | 96,856 | 97,829 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 5 | 12540 | 94,870 | 94,899 | 94,876 | 94,373 | 95,321 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4) Resistencia Entre Terminales: A.T. (Ω): 1,706 B.T. (mΩ): 0,769 U-V: 1,710 V-W: 1,710 W-U: 1,709 Promedio: 1,708 Máx. Fabric.: COBRE COBRE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5) Ensayos de Aislamiento: Tensión Aplicada durante 60 Segundos: BT Contra AT y Tierra (kV): 10,0 AT Contra BT y Tierra (kV): 34,0 Tensión (V): 458 Frecuencia (Hz): 120 Tiempo (S): 60 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6) Ensayo sin Carga: Tensión (V): 229 Corriente (A): 4.344 P (W): 3.779 Medidas: 20 Retardos a (°C): 85 Garantizadas a (°C): 85 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7) Ensayo en Corto Circuito: Corriente (A): 27,56 Tensión (V): 582,00 Pérdidas (W): 5797,00 I²R (W): 4858,31 4,41 4846,86 6099,14 4,45 7140,00 4,30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Regulación a plena carga y I.p. = 0,8 (%): 3,50 Eficiencia a plena carga y I.p. = 0,8 (%): 98,47 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Características Mecánicas Masa Total (Kg): 1560 Vol. Líq. Aisl. (l): 330 Dimens. Aprox. Totales (m): 2,530 x 1,430 x 1,200 Alto: 1,200 Pintura: POLIURETANO ANSI 70 Espesor (µm): > 140 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Número de Elementos Reducción: 6 x 9 Largo Plad. (mm): 0,32 Ancho Plad. (mm): 0,32 Lámina: Color: M4-0.27-KAWASAKI | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Observaciones: LIBRE DE PCB'S. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cliente/Interventor: | | | | | Siemens/Control Calidad: JOSIE BETANCOURT Fecha Fabric: 27 JUN 2012 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Matricula No.: | | | | | Fecha Documento: 27 JUN 2012 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 6. Ficha técnica del transformador del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

Teniendo en cuenta mediciones de tensión tomadas en el Edificio y que el transformador opera con una derivación de menor valor a la tensión nominal de la placa, se establece una tensión nominal de 220 V para la red de BT del Edificio. La información necesaria para crear un nuevo tipo de transformador en PowerFactory se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4.

Características del transformador del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

| Transformador | | |
|----------------------|-------------------------|---------------------------|
| Características | Descripción | Tensión nominal |
| Tecnología | Transformador Trifásico | Lado de Alta (AT) 13,2 kV |
| Potencia nominal | 0,63 MVA | Lado de Baja (BT) 220 V |
| Frecuencia nominal | 60 Hz | Grupo vectorial |
| Pérdidas en el cobre | 1,285 kW | Dyn5 |

Para crear un nuevo tipo de transformador, se hace doble clic sobre la representación gráfica del elemento transformador como se resalta con un cuadro rojo de la Figura 7. De esta manera, se despliega la *ventana de ajustes del elemento*, tal como se muestra en la Figura 8. En ésta se presenta por defecto los datos generales del transformador; para seleccionar el tipo de transformador a usar se debe pulsar en tipo y seleccionar la opción de “nuevo tipo de proyecto”. La Figura 9 presenta la ventana para la configuración del nuevo tipo.

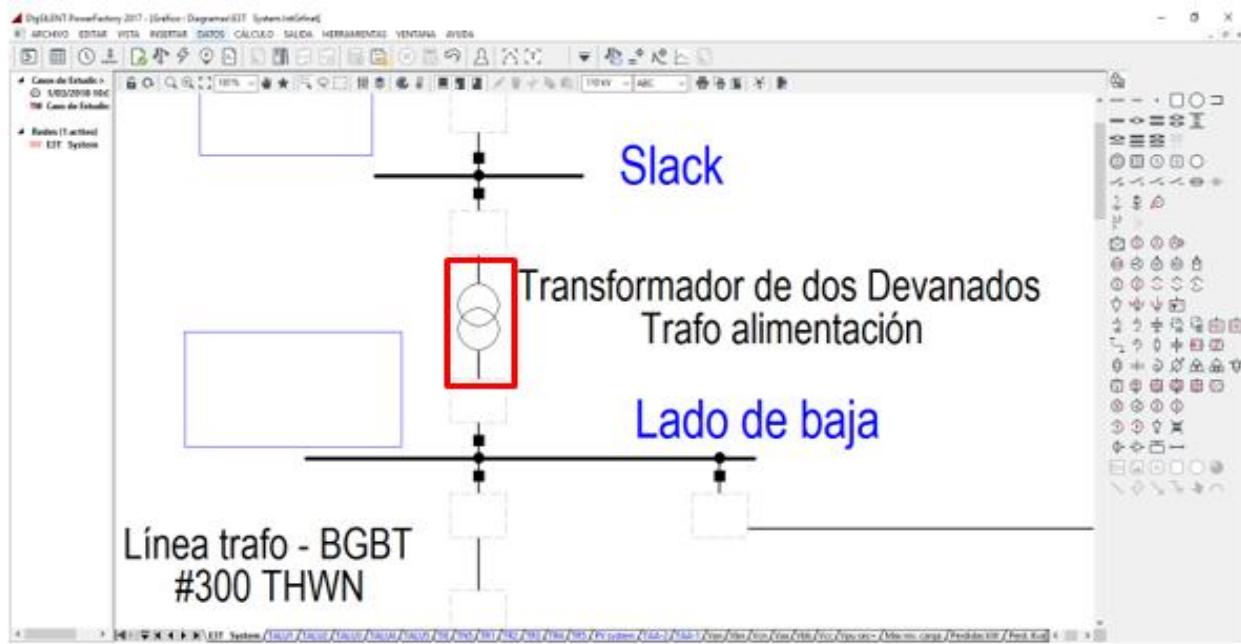


Figura 7. Ventana gráfica de PowerFactory con elemento transformador resaltado.

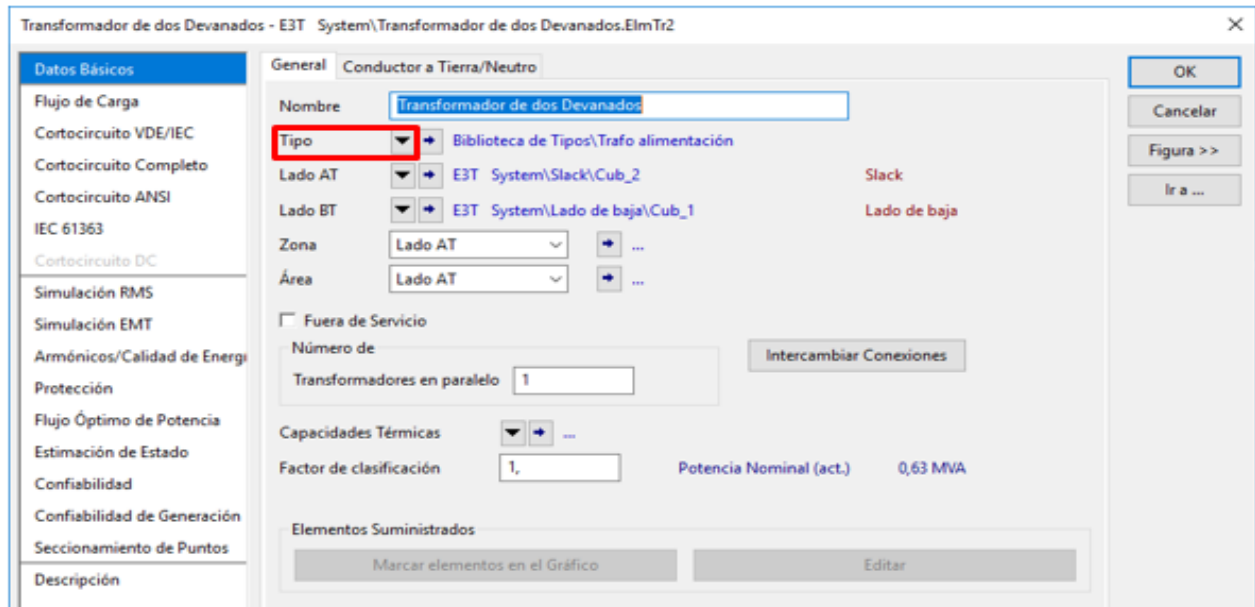


Figura 8. Ventana de configuración datos básicos para transformador.

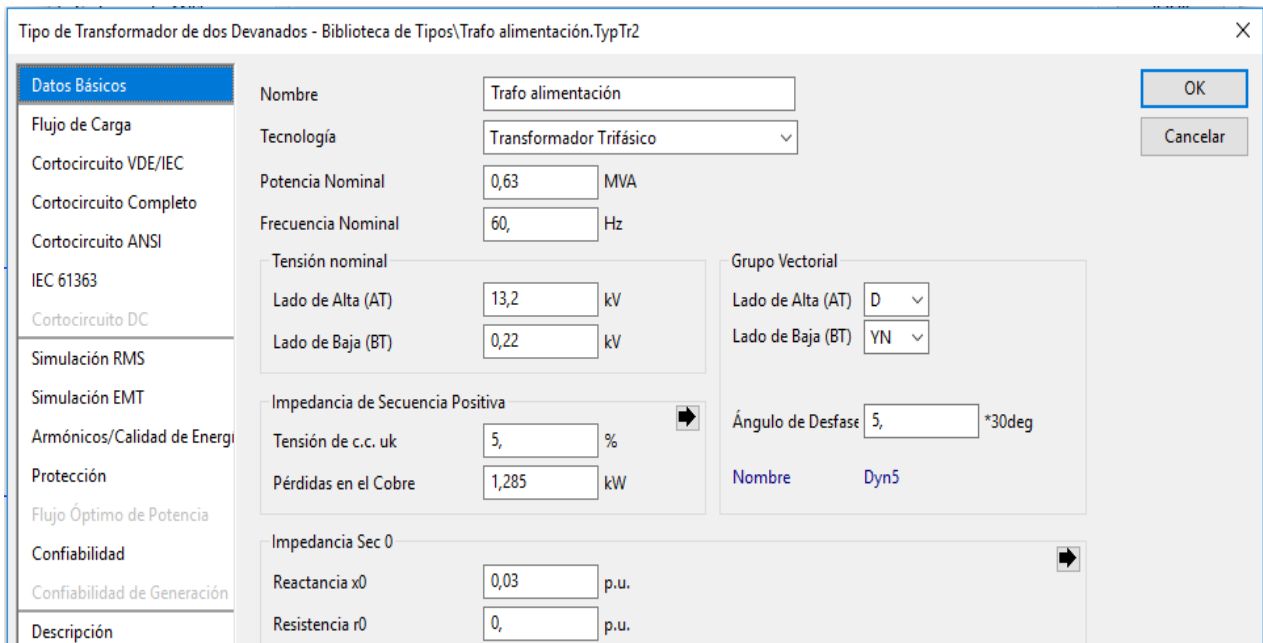


Figura 9. Ventana de asignación de datos básicos para nuevo tipo de proyecto elemento transformador.

3.2.2 Configuración de los barrajes. El Edificio de Ingeniería Eléctrica cuenta con varios tipos de barrajes con diferentes capacidades amperimétricas. La Tabla 5 proporciona la información

necesaria para crear los nuevos tipos de elementos, este procedimiento es similar al expuesto en la configuración del transformador.

Tabla 5.
Barrajes del Edificio de Ingeniería Eléctrica

| Barrajes | | |
|--|-----------------------|------------------------------------|
| Nombre | Característica | Capacidad amperimétrica [A] |
| Barraje lado de baja del transformador | Trifásico y neutro | 2000 |
| Barraje general de baja tensión | Trifásico y neutro | 800 |
| Barraje de transferencia | Trifásico y neutro | 700 |
| Barraje de emergencia | Trifásico y neutro | 160 |
| Barrajes de piso | Trifásico y neutro | 100 |

La Figura 10 resalta el elemento gráfico que representa un barraje en el diagrama unifilar creado en PowerFactory. Al hacer doble clic sobre este dibujo se habilita la *ventana de ajustes del elemento barraje*, mostrada en la Figura 11. Allí se resaltan en color verde los parámetros a configurar del barraje. Para el *tipo de sistema*, se despliega una barra con tres opciones las cuales son: AC, DC o AC/BI. En *Uso*, también se pueden asignar una de tres opciones: barra, nodo de unión o nodo auxiliar. La *Tecnología de Fases* permite 9 tipos de arreglo que son: ABC, ABC-N, BI, BI-N, 2F, 2F-N, 1F, 1F-N y N y, por último, en la *Tensión Nominal* se asigna la tensión de línea-línea y PowerFactory por defecto asigna la tensión fase-tierra.

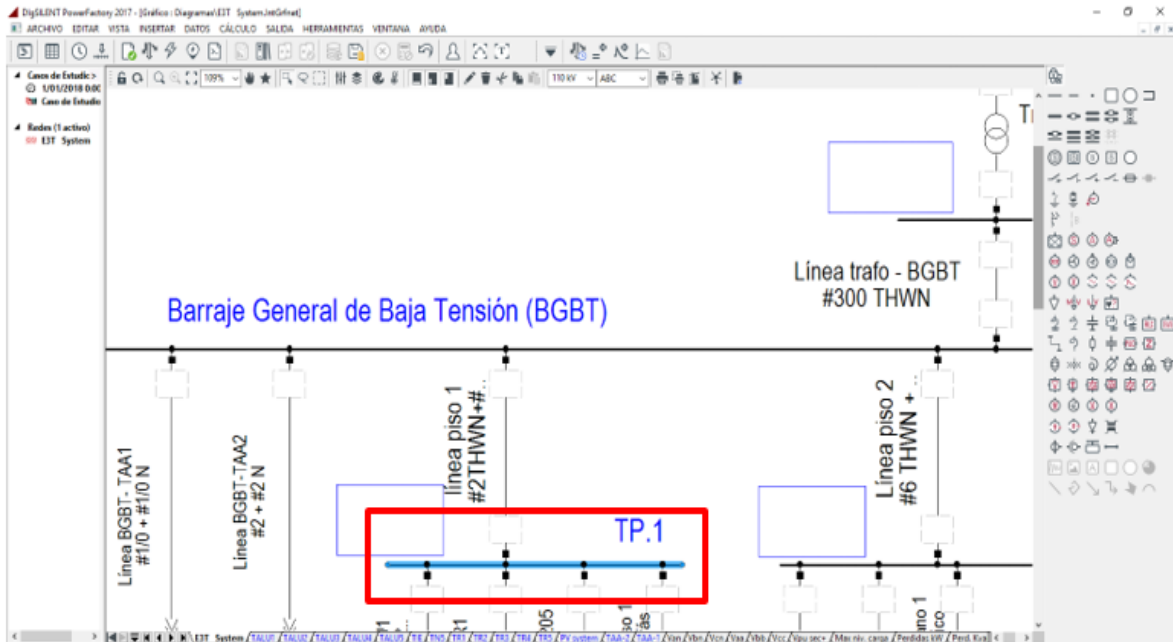


Figura 10. Ventana gráfica de PowerFactory con elemento barraje resaltado.

Figura 11. Ventana de configuración datos básicos para elemento barraje.

Una vez configurados los datos básicos se procede a crear el nuevo tipo de elemento. Dentro de la ventana de nuevo tipo de proyecto, en la pestaña *Datos Básicos* se designa la denominación del nuevo tipo, así como la tensión nominal de este barraje como se muestra en la Figura 12. En la pestaña *Cortocircuito ANSI* es posible definir la corriente pico de cortocircuito que soporta el barraje, esta configuración es ilustrada en la Figura 13.

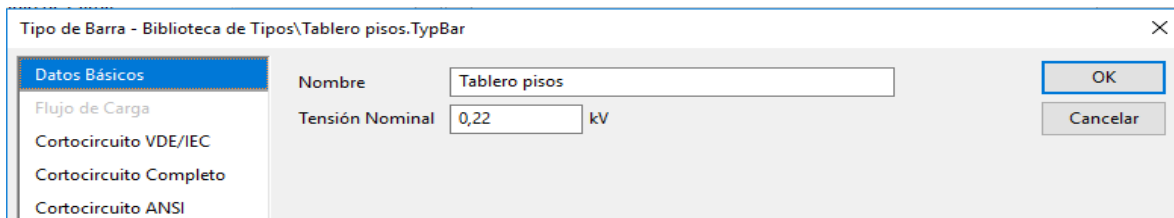


Figura 12. Ventana de asignación de datos básicos para nuevo tipo de proyecto elemento barraje.

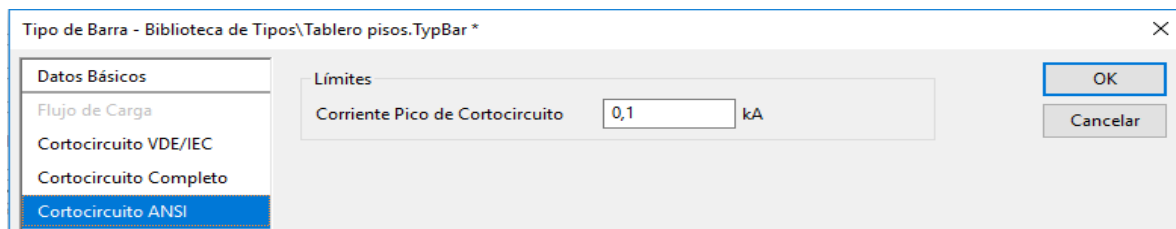


Figura 13. Ventana de asignación corriente de cortocircuito para nuevo tipo de proyecto elemento barraje.

3.2.3 Configuración de los conductores. En cuanto a los conductores, la red eléctrica del Edificio de Ingeniería Eléctrica está conformada por diferentes calibres de conductor eléctrico THWN, estos datos están listados en la Tabla 6 y fueron utilizados para la creación de los nuevos tipos de proyecto para los respectivos conductores de la red. Esta tabla se construyó a partir de revisión de planos eléctricos del Edificio y la inspección de recintos, los datos de corriente fueron tomados según fabricantes y los valores de impedancia fueron tomadas del Código Eléctrico Colombiano NTC 2050. La primera columna, tanto de resistencia como de reactancia, hace referencia al conductor de fase y la segunda para el conductor de neutro.

Tabla 6.

Conductores que conforman la red Eléctrica del Edificio de Ingeniería Eléctrica

| CONDUCTORES | | | | | | |
|---------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|-------|----------------------|-------|
| Calibre | I nominal en el aire [A] | I nominal enterrado [A] | Resistencia [Ω/km] | | Reactancia [Ω/km] | |
| #300 THWN | 445 | 285 | 0,144 | - | 0,1345 | - |
| #2/0 + #1/0 N | 265 | 175 | 0,328 | 0,394 | 0,141 | 0,144 |
| #1/0 + #1/0 N | 230 | 150 | 0,394 | 0,394 | 0,144 | 0,144 |
| #2 + #2 N | 170 | 115 | 0,623 | 0,623 | 0,148 | 0,148 |
| #4 + #6 N | 125 | 85 | 1,02 | 1,61 | 0,157 | 0,167 |
| #4 + #8 N | 125 | 85 | 1,02 | 2,56 | 0,157 | 0,171 |
| #6 + #6 N | 95 | 65 | 1,61 | 1,61 | 0,167 | 0,167 |
| #6 + #8 N | 95 | 65 | 1,61 | 2,56 | 0,167 | 0,171 |
| #8 + #8 N | 70 | 50 | 2,56 | 2,56 | 0,171 | 0,171 |
| #8 + #10 N | 70 | 50 | 2,56 | 3,94 | 0,171 | 0,164 |
| #10 + #10 N | 50 | 35 | 3,94 | 3,94 | 0,164 | 0,164 |
| #10 + #12 N | 50 | 35 | 3,94 | 6,56 | 0,164 | 0,177 |
| #12 + #14 N | 35 | 25 | 6,56 | 10,17 | 0,177 | 0,19 |
| #14 + #14 N | 30 | 20 | 10,17 | 10,17 | 0,19 | 0,19 |

Una vez representado el conductor en el diagrama unifilar como se muestra en la Figura 14 se procede a realizar la edición de las características de este. La Figura 15 presenta la *ventana de ajustes*, donde se configura aspectos como la longitud del conductor, la cual fue obtenida acotando los planos del edificio en AutoCAD, cabe resaltar que esta medición está sobredimensionada un 20% (Ver Apéndice B para más información) y se seleccionó el parámetro concentrado (PI) como modelo para el conductor, por último, se crea un nuevo tipo de conductor como se muestra en la ventana de la Figura 16. Allí se asignan las diferentes características eléctricas del conductor listadas en la Tabla 6, en la opción *tipo de sistema* se puede elegir entre AC, DC y AC/BI.

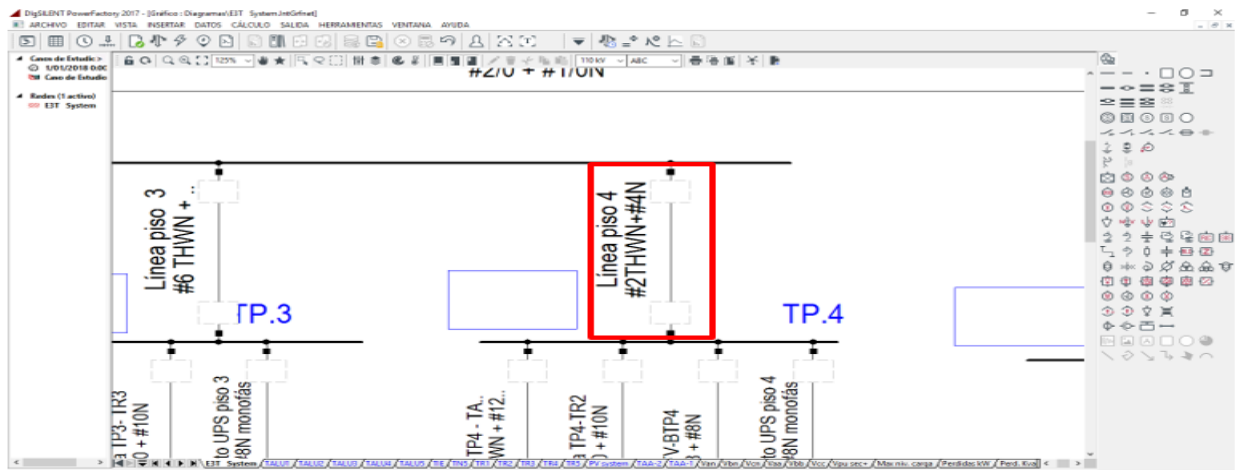


Figura 14. Ventana gráfica de PowerFactory con elemento línea/conductor resaltado.

| Valores resultantes | |
|----------------------------|----------------|
| Corriente Nominal (act.) | 0,115 kA |
| Impedancia Sec. Pos. Z1 | 0,01634146 Ohm |
| Impedancia Sec. Pos. Áng. | 12,71363 deg |
| Resistencia Sec. Pos. R1 | 0,0159408 Ohm |
| Reactancia Sec. Pos. X1 | 0,0035964 Ohm |
| Resistencia Sec. Cero, R0 | 0, Ohm |
| Reactancia Sec. Cero, X0 | 0, Ohm |
| Corriente de tierra, Ice | 0, A |
| Factor tierra k0, Magnitud | 0,3333333 |
| Factor tierra k0, Áng. | 180, deg |

Figura 15. Ventana de configuración datos básicos para elemento línea/conductor.

Figura 16. Ventana de asignación de datos básicos para nuevo tipo de proyecto elemento línea/conductor.

3.2.4 Configuración de las cargas. Como se evidencia en el Capítulo 2, el Edificio cuenta con una cantidad considerable de cargas, para simplificar el modelado de la red eléctrica en PowerFactory se categorizaron las cargas, esto permitió agrupar las cargas que estaban conectadas a un mismo circuito como una única carga, dicha carga tiene como potencia nominal la suma de las potencias nominales de cada elemento agrupado, para determinar la nueva longitud del conductor se hizo un promedio entre la carga más lejana y la que estaba más cerca al punto de alimentación. El Apéndice C presenta la información completa de las cargas, con su respectivo circuito y potencia asignada.

La Figura 17 se muestra resaltado el elemento gráfico que representa a una carga en la ventana gráfica de PowerFactory. La Figura 18 muestra pantalla de datos básicos asociada a la ventana de ajustes. En esta es posible configurar el nombre de la carga. La Figura 19 presenta la pantalla de *Flujos de Carga*, en la que se configuran datos como el modo entrada entre nueve opciones diferente (Estándar, P Q, P cos(fi), I cos(fi), S cos(fi), Q cos(fi), I P, S P, S Q). Otras configuraciones realizadas son el estado de la carga, ya sea esta balanceada o desbalanceada; el

valor de potencia nominal y el factor de potencia de la carga y, por último, el tipo de carga a manejar si es inductiva o capacitiva. Cabe resaltar que el factor de potencia para todas las cargas se asumió 0,95, siendo este un resultado aproximado de promediar el factor de potencia de las diferentes cargas, tanto el valor en ficha eléctrica como en mediciones de la red del Edificio.

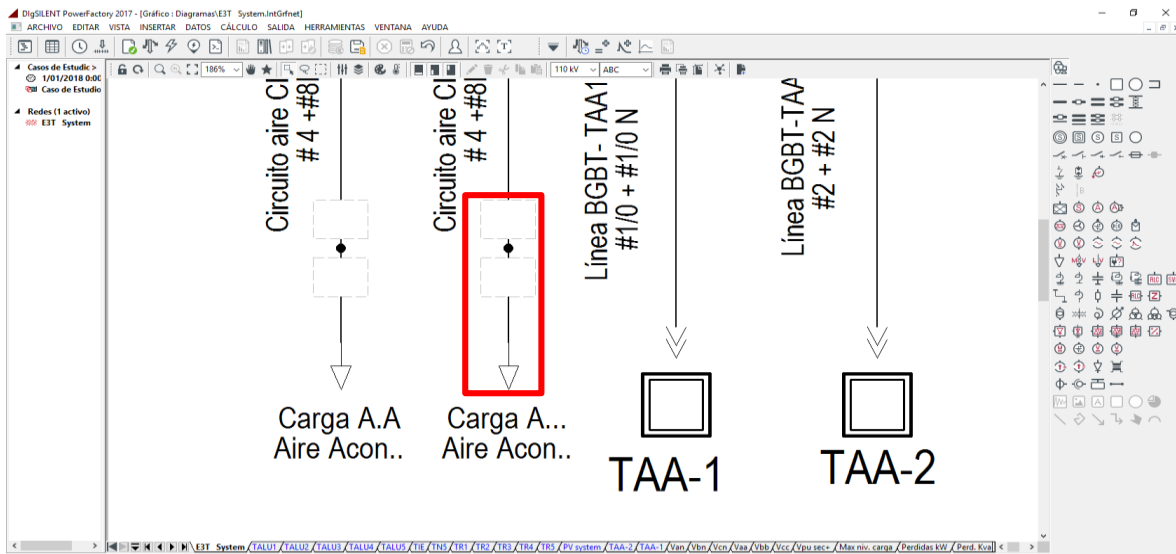


Figura 17. Ventana gráfica de PowerFactory con elemento carga resaltado.

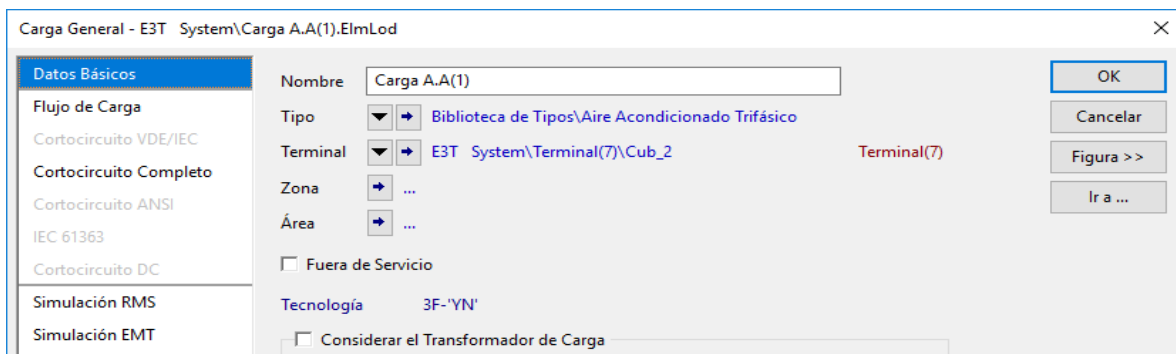


Figura 18. Ventana de configuración datos básicos para elemento carga.

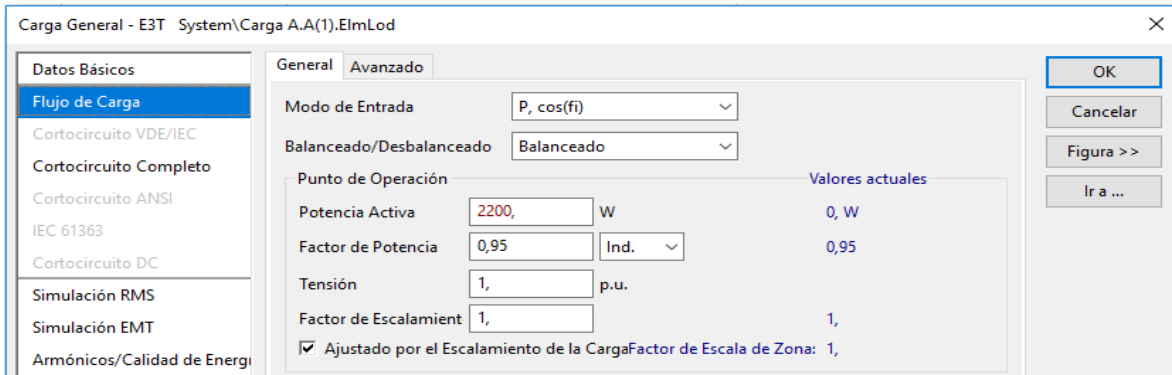


Figura 19. Ventana de configuración en flujo de carga para elemento carga.

En la *ventana de ajustes* del nuevo tipo mostrada en la Figura 20, se configuraron datos como el nombre de la carga, el tipo de sistema (AC o DC) y la tecnología de conexión (3F-‘D’, 3F F-T, 3F-‘YN’, 2F F-T, 2F-‘YN’, 1F F-F, 1F F-N, 1F F-T).

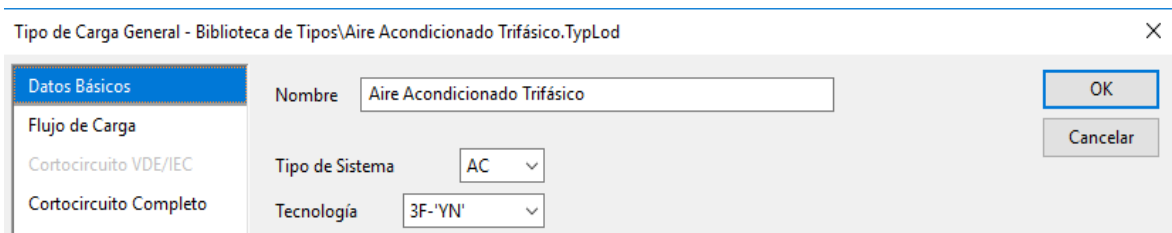


Figura 20. Ventana de asignación de datos básicos para nuevo tipo de proyecto elemento carga.

La Figura 21 muestra el contenido de la pestaña de *flujo de carga* de la ventana de ajustes del nuevo tipo de elemento de carga. En ésta se configuraron los coeficientes del modelo ZIP definidos para cada tipo de carga teniendo en cuenta la potencia nominal.

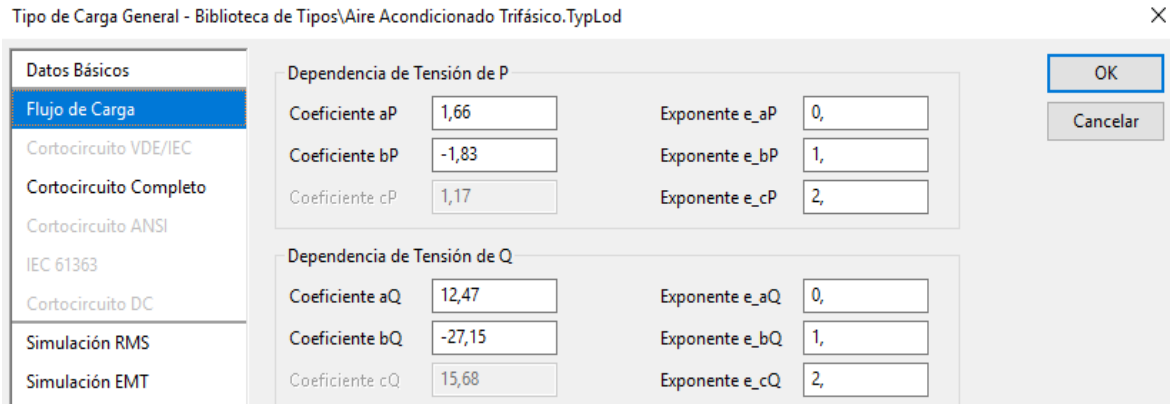


Figura 21. Ventana de asignación en flujo de carga para nuevo tipo de proyecto elemento carga.

3.2.5 Configuración del sistema fotovoltaico. El sistema fotovoltaico que se encuentra en el Edificio tiene características que hacen que su implementación en PowerFactory sea sencilla, una de las características es que existe un microinversor asociado a cada panel fotovoltaico, por lo que se evita la creación de un inversor que trabaje para todo el sistema; adicionalmente, PowerFactory proporciona el elemento *Sistema PV*, el cual permite configurar un sistema fotovoltaico con un inversor incluido pre-programado como se muestra en la Figura 22.

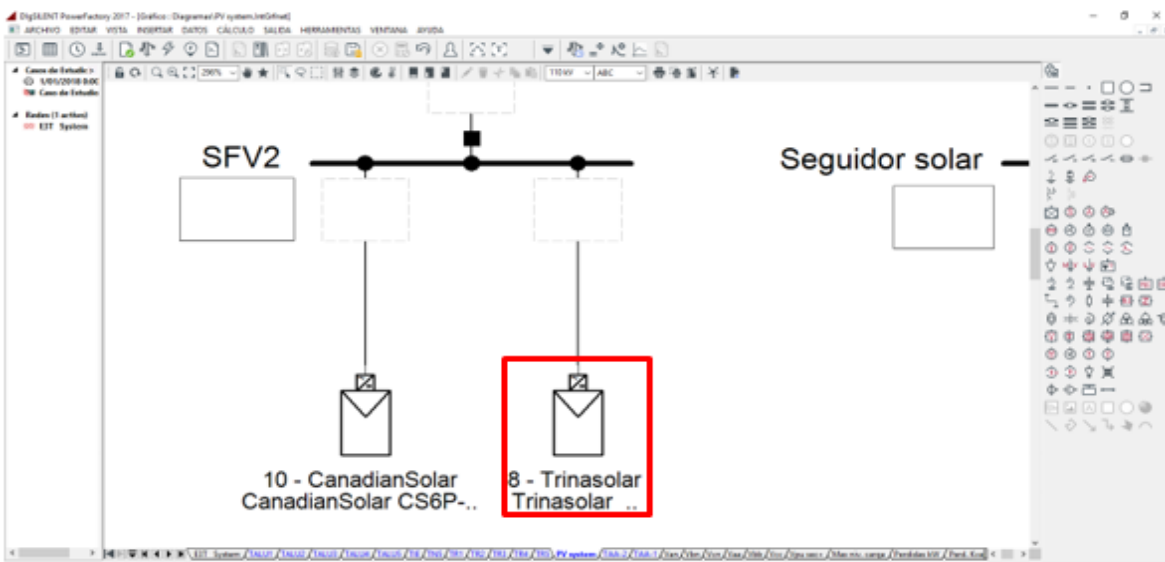


Figura 22. Ventana gráfica de PowerFactory con elemento sistema PV resaltado.

La Figura 23 muestra la ventana de ajustes del elemento *Sistema PV*, que permite la configuración de parámetros como el modelo de panel (cálculo solar o potencia activa), la tecnología (3F, 3F-T, 1F F-T, 1F F-N), el número de inversores paralelos, el cual describe la cantidad de paneles conectados a una misma acometida, el total de paneles por inversor y los valores nominales del panel como potencia aparente nominal y factor de potencia.

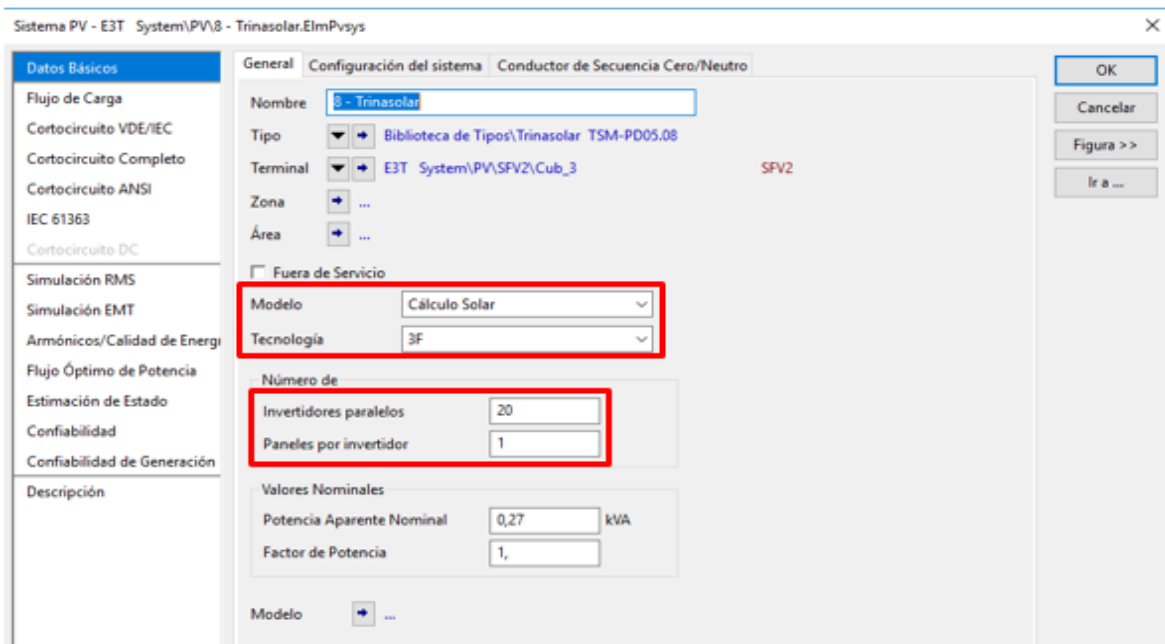


Figura 23. Ventana de configuración datos básicos para elemento sistema PV.

Para la configuración del sistema fotovoltaico se realiza en la ventana de ajustes del elemento *Sistema PV*. En esta inicialmente, se debe crear un nuevo tipo de panel, en el que se ingresan las características nominales suministrada por los fabricantes como se muestra en la Tabla 1. La Figura 24 ejemplifica esta configuración para un panel FV Trinasolar TSM-PD05.08

Panel PV - Biblioteca de Tipos\Trinasolar TSM-PD05.08.TypPvpanel

Datos Básicos

Nombre: Trinasolar TSM-PD05.08

Potencia Pico (MPP=): 270 W

Tensión Nominal (MPP): 30,9 V

Corriente Nominal (MPP): 8,73 A

Tensión de Circuito Abierto: 38,4 V

Corriente de Cortocircuito: 9,18 A

Material: Silicio Policristalino (Poli-Si)

Usar Valores Típicos

Coef. Temperatura (P): -0,4 %/degC

SINCT: 45, degC

OK

Cancelar

Figura 24. Ventana de asignación de datos básicos para nuevo tipo de proyecto elemento sistema PV.

3.2.6 Configuración de la red externa. Para el modelado de la red de baja tensión del Edificio de Ingeniería Eléctrica es necesario contar con una red que suministre la potencia necesaria para suplir la demanda de las cargas del Edificio, la red externa cumple esta función, para el objeto de estudio la red externa representa la red de MT a la cual el Edificio está conectado.

La red externa sirve para definir el punto de referencia base para el estudio, el barraje al cual se conecta esta red se define como barra de referencia o barra Slack. En esta barra se concretan los valores de referencia para el estudio como la magnitud y el ángulo de la tensión.

En la Figura 25 se resalta el elemento gráfico que representa al elemento *red externa* en la ventana gráfica de PowerFactory. Al hacer doble clic sobre el elemento se habilita la ventana de ajustes como se muestra en la Figura 26, allí se realizó la configuración de *tipo* de barra, los cuales son: PQ, PV y Slack, asignando esta última como opción para este caso de estudio.

Una vez realizada las anteriores configuraciones, es posible incluir la ubicación de la red externa. Para ello, se abre la ventana de configuración del elemento, dentro de la pestaña lateral izquierda *descripción* y la pestaña superior *coordenadas graficas* se agrega la posición GPS que

para nuestro caso se tiene $7,12539^\circ$ de latitud y -73.1198° de longitud como se muestra en la Figura 27.

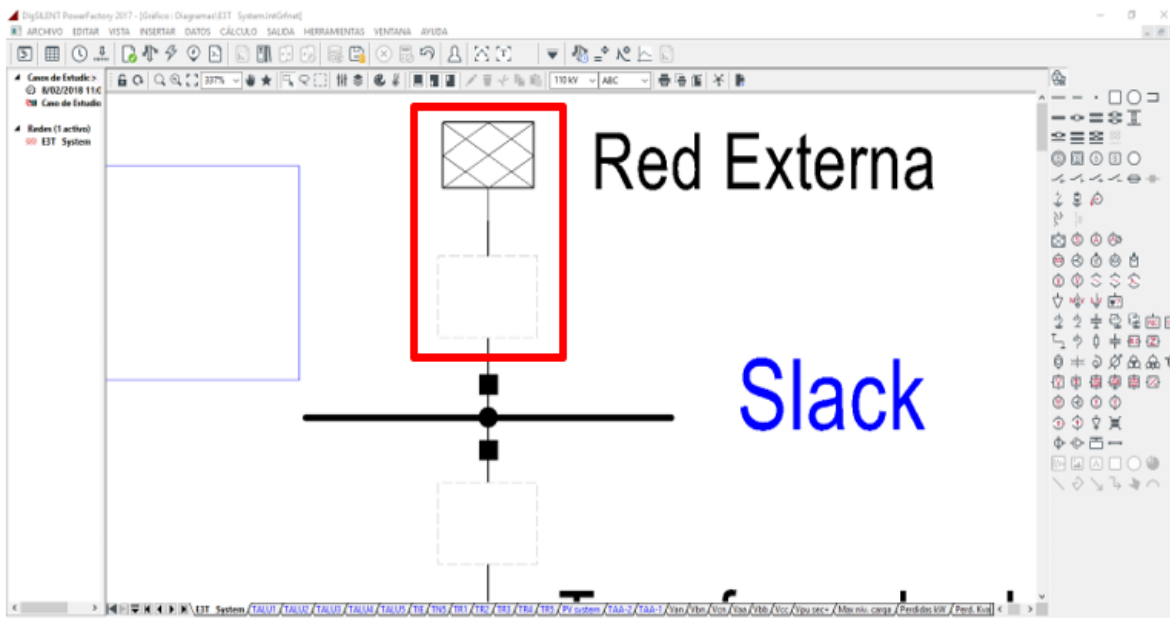


Figura 25. Ventana gráfica de PowerFactory con elemento sistema PV resaltado.

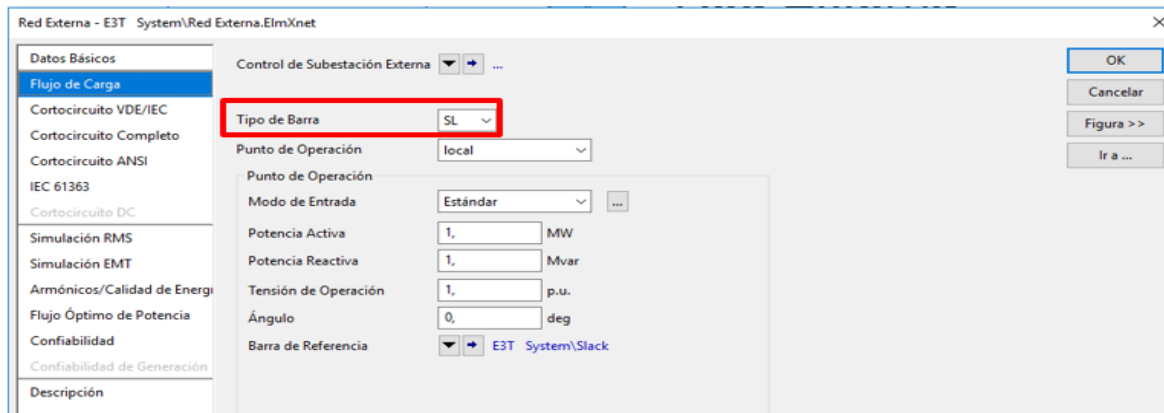


Figura 26. Ventana de configuración flujo de carga para elemento red externa.



Figura 27. Ventana de configuración descripción en la opción coordenadas gráficas para elemento red externa.

3.3 Diagrama unifilar de la red de BT en PowerFactory

Configurados cada uno de los elementos que conforman la red eléctrica de baja tensión del Edificio de Ingeniería Eléctrica, se procede realizar la conexión de éstos para crear un diagrama unifilar que represente de manera muy aproximada el estado actual de esta red. Al revisar la información acerca del Edificio se encontró el diagrama unifilar presentado en la Figura 28.

Tal diagrama fue usado como referencia para la ubicación de los barrajes, transformador, conductores, tableros y cargas en el diagrama unifilar configurado en PowerFactory. Posteriormente, tras varias visitas de inspección, se realizó la actualización del diagrama suministrado el cual es presentado en la Figura 29.

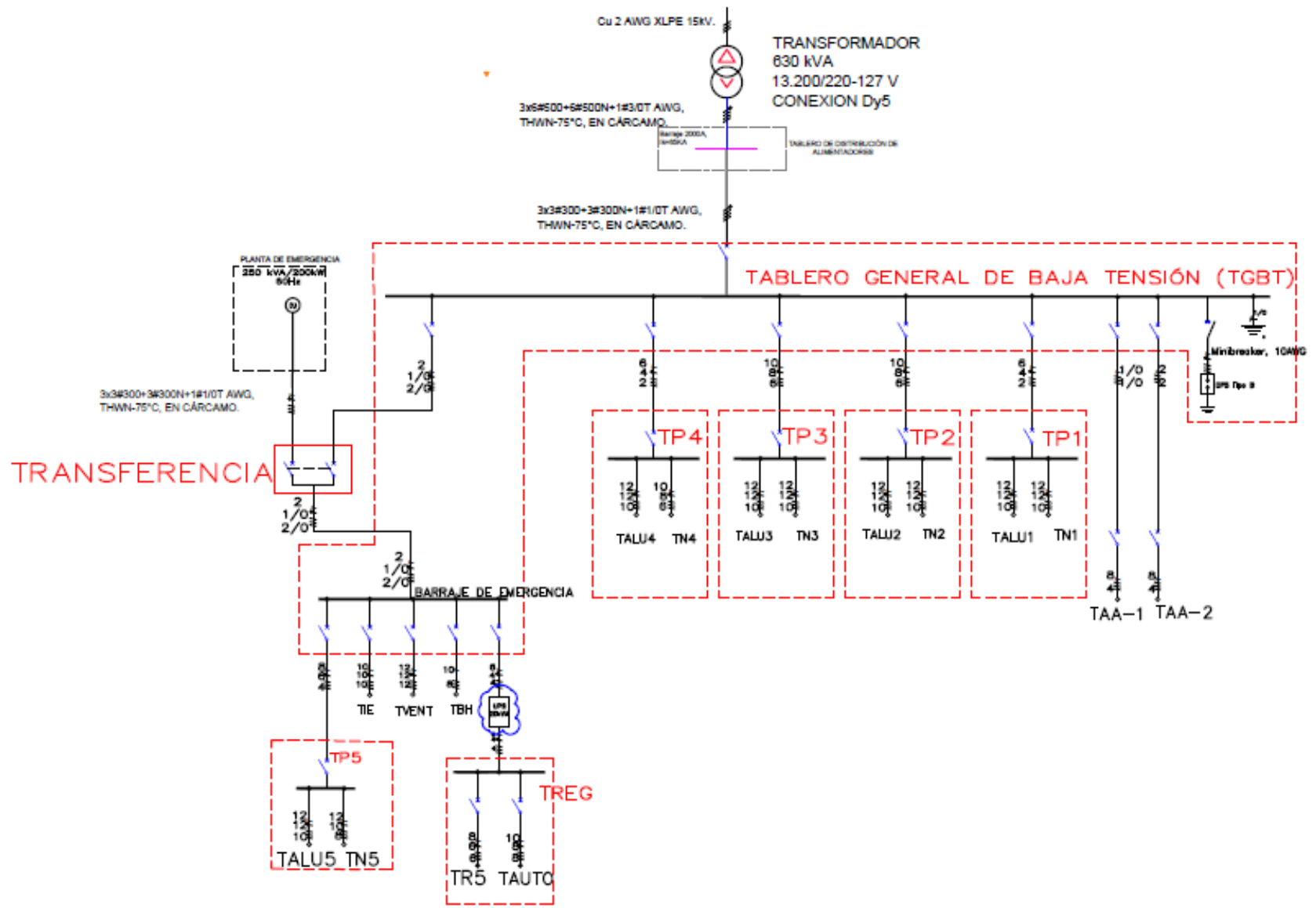


Figura 28. Diagrama unifilar de la red eléctrica del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

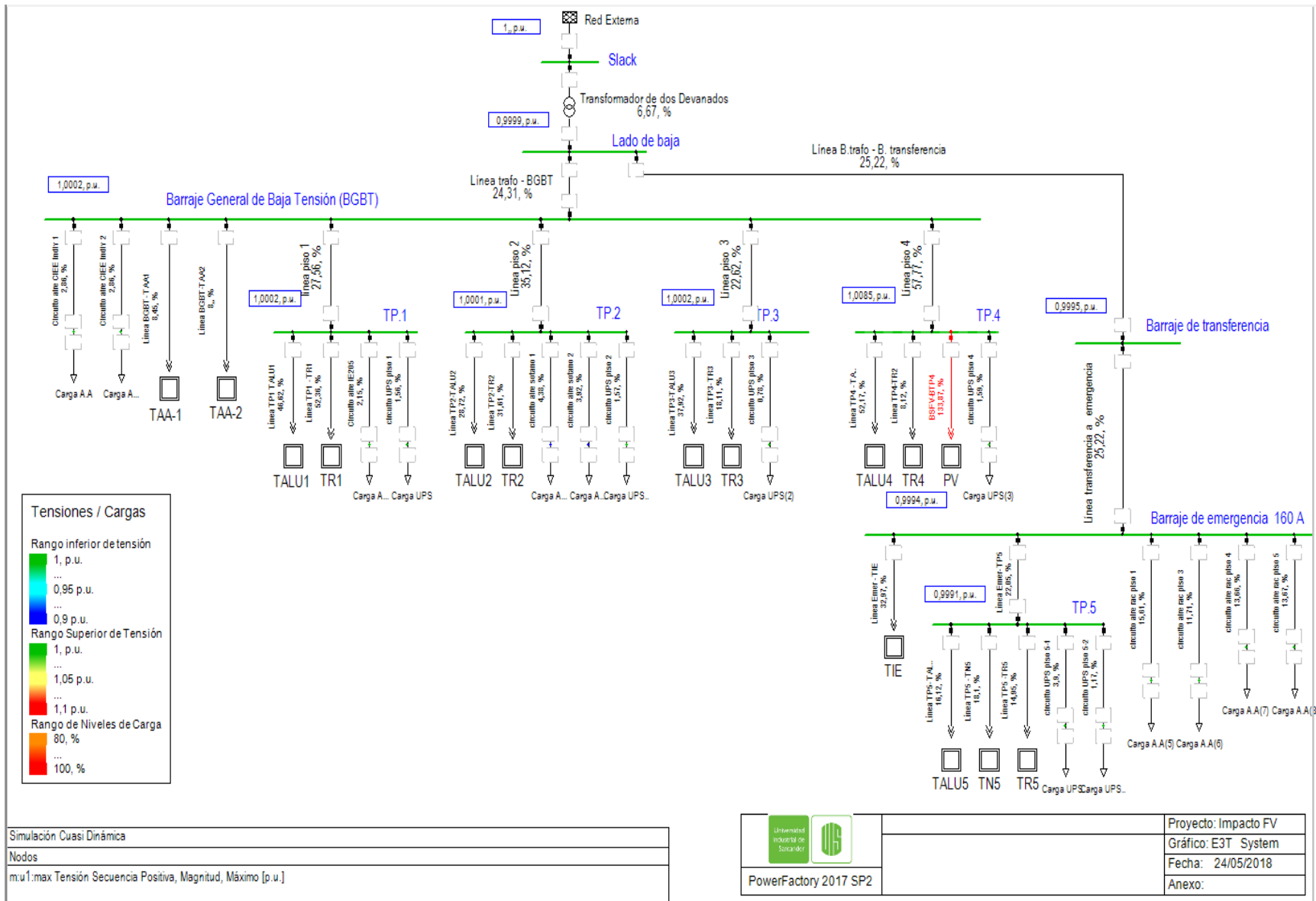


Figura 29. Diagrama unifilar de la red eléctrica del Edificio de Ingeniería Eléctrica en PowerFactory.

4. Simulación del comportamiento de la red eléctrica de BT sin generación FV y para diversos escenarios de generación FV.

Utilizando el diseño de la red eléctrica del Edificio de Ingeniería Eléctrica (conductores, transformador, barrajes, cargas, red externa y SFV), se realizó la simulación de flujo de carga de la red eléctrica durante un año (día a día) y se simuló la producción de energía FV iniciando con generación FV nula hasta un máximo de 25 kW, aumentando 5 kW para cada escenario. Para esto, se utilizó la herramienta *simulación cuasi-dinámica*⁴ de PowerFactory.

4.1 Definición de los escenarios de simulación para el modelado de demanda.

Para determinar los flujos de carga que circulan por la red de BT en el año 2018, se programaron tres escenarios de interés, estos se definieron como: Semana tipo cero, semana tipo uno y semana tipo dos. La semana tipo cero presenta el menor consumo dado que, no se cuenta con personal administrativo, docente y estudiantes en el Edificio. En la semana tipo uno está presente todo el personal administrativo, docentes y estudiantes siendo esta, la semana de mayor consumo. Por último, la semana tipo dos donde se cuenta con sólo personal administrativo y docentes. Estos escenarios se analizaron para los siete días de la semana, veinticuatro horas del día en pasos de una hora.

Se configuró el escenario anual usando el calendario académico UIS 2018 y se asignaron los valores de irradiancia obtenidos para cada día, estableciendo un amplio escenario de estudio.

⁴ Simulaciones cuasi-dinámica, herramienta de PowerFactory que ejecuta el cálculo de flujos de carga ante variables en función de un periodo de tiempo deseado, a diferencia de la simulación dinámica que ejecuta el flujo controlando todas las variables en tiempo real (Gaitán, Luis; Gómez, Juan; Rivas, 2018).

La Tabla 7 muestra las fechas de inicio y fin para cada tipo de semana, con la actividad que las describe.

Tabla 7.

Fechas que conforman cada tipo de semana con sus respectivas actividades.

| Fecha inicio | Fecha fin | Semana tipo | Actividad |
|---------------------|------------------|--------------------|-------------------------------|
| 01/01/2018 | 17/01/2018 | Cero | Vacaciones inicio de año |
| 18/01/2018 | 28/01/2018 | Dos | Jornada administrativa 2018-1 |
| 29/01/2018 | 25/03/2018 | Uno | Actividad académica 2018-1 |
| 26/03/2018 | 01/04/2018 | Cero | Semana santa |
| 02/04/2018 | 06/06/2018 | Uno | Actividad académica 2018-1 |
| 07/06/2018 | 18/06/2018 | Dos | Jornada administrativa 2018-1 |
| 19/06/2018 | 02/07/2018 | Dos | Vacaciones mitad de año |
| 03/07/2018 | 12/08/2018 | Dos | Jornada administrativa 2018-2 |
| 13/08/2018 | 18/12/2018 | Uno | Actividad académica 2018-2 |
| 19/12/2018 | 24/12/2018 | Dos | Jornada administrativa 2018-2 |
| 25/12/2018 | 31/12/2018 | Cero | Vacaciones fin de año |

4.2 Definición de los escenarios de simulación para la inyección de energía fv

Este trabajo propone analizar el impacto en el perfil de tensión y las pérdidas de energía en los conductores al inyectar energía FV, estableciendo escenarios con nivel de penetración de 5 kW, 10 kW, 15 kW, 20 kW y 25 kW de la potencia instalada en la generación FV conectada al Tablero de Distribución del Piso 4 - TDP4. Como se mencionó, se cuenta con tres arreglos de paneles SFV1, SFV2 y el seguidor solar, cada valor de capacidad instalada se conforma con la cantidad y

marca de paneles mostrados en la Tabla 8. La figura 30 muestra el arreglo FV para 10 kW de capacidad instalada.

Tabla 8.
Número de paneles según la capacidad instalada y el arreglo del SFV.

| Capacidad instalada [kW] | Número de paneles según capacidad instalada | | | | | |
|--------------------------|---|-------|----------|----------|-------|----------------|
| | SFV1 | | | SFV2 | | Seguidor solar |
| | UP | Trina | Canadian | Canadian | Trina | Canadian |
| | Solar | Solar | Solar | Solar | Solar | Solar |
| 5 | 2 | 3 | 5 | 5 | 4 | 1 |
| 10 | 3 | 5 | 10 | 10 | 8 | 1 |
| 15 | 6 | 9 | 16 | 15 | 12 | 2 |
| 20 | 6 | 10 | 20 | 20 | 16 | 2 |
| 25 | 8 | 13 | 25 | 25 | 20 | 3 |

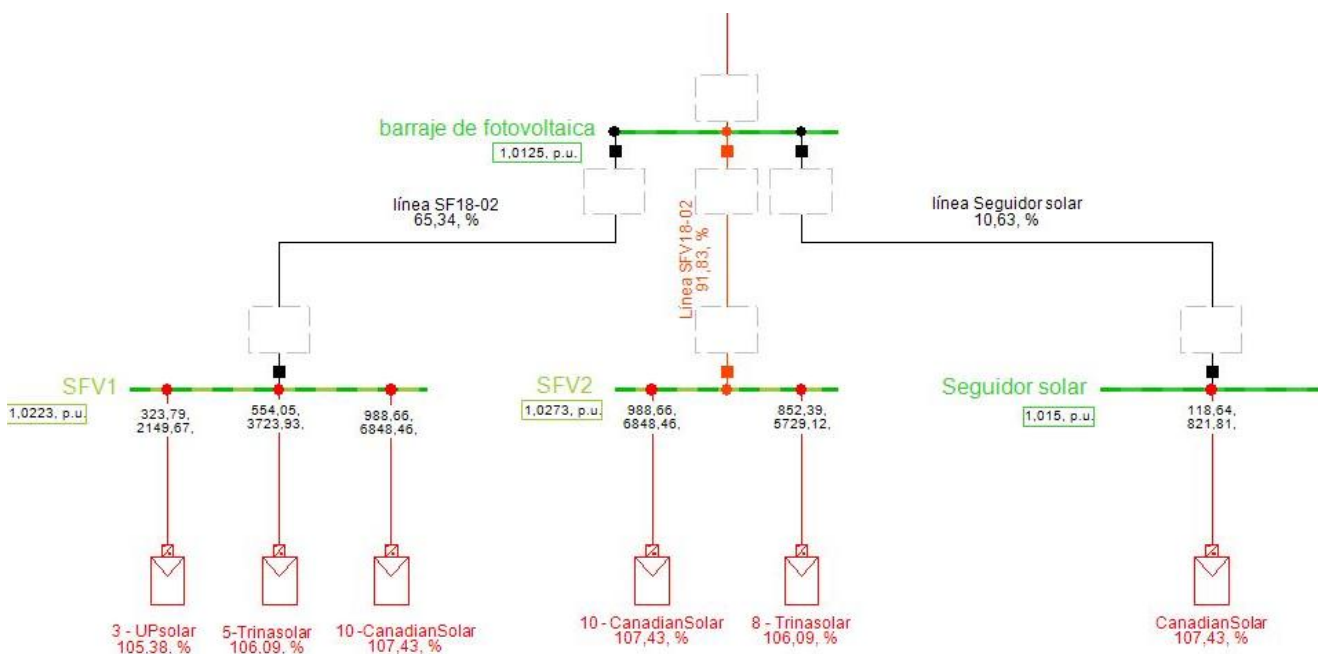


Figura 30. Representación de los SFV en PowerFactory para una capacidad instalada de 10kW de generación FV.

4.3 Configuración de escenarios para cargas en la herramienta simulación cuasi-dinámica

En el modelado de la demanda del Edificio, se realizaron ajustes en el escenario de simulación para cada piso del Edificio, para así acercar el consumo total de energía medido al consumo simulado. Para alcanzar esta representación de escenarios, se debe agregar una nueva característica de tiempo brindada por PowerFactory, dando doble clic sobre la carga la cual se le quiere aplicar el escenario, luego de esto, se despliega la ventana como se muestra en la Figura 31, allí se hace clic derecho sobre el recuadro de *Potencia Activa*, se selecciona la opción de *Agregar Característica del Proyecto* y se elige *Característica de tiempo* dando clic sobre éste.

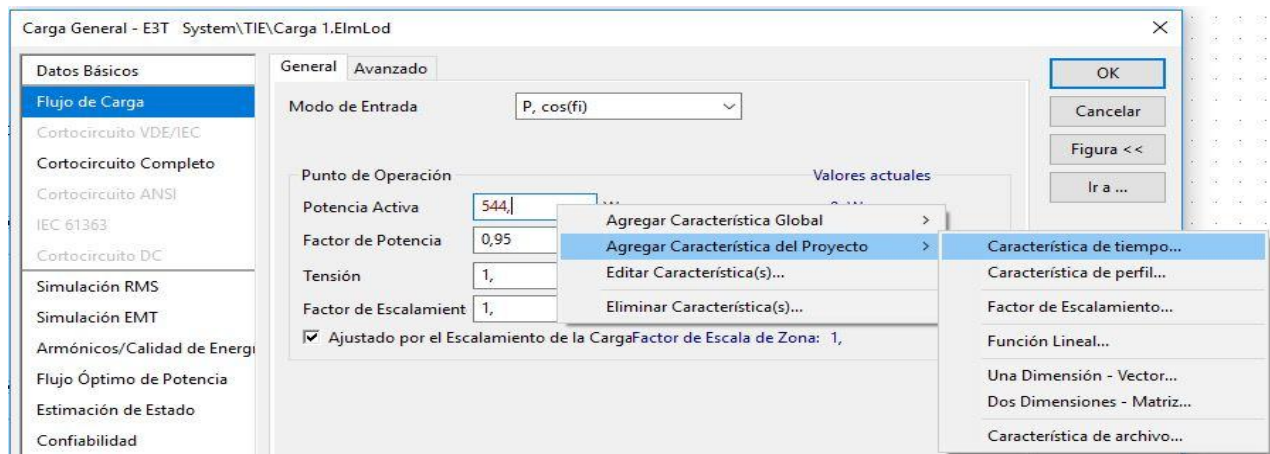


Figura 31. Agregar característica de tiempo del Proyecto para una carga.

Al crear esta nueva característica, se despliega la ventana *Característica de tiempo* como se muestra en la Figura 32, ahí se configura el comportamiento de la carga durante todo el año. Para ingresar las variaciones de potencia al programa, se realiza una tabla (formato .csv) donde se establece el porcentaje de potencia que está demandando la carga en ese instante de tiempo. como

se muestra en la Figura 33. En esta ventana de ajustes se configura *Parámetro*, *Fuente de datos*, *Formato de tiempo*, *Nombre*, *Formato*, *Columna de Tiempo*, *Columna de Datos* y *Uso* que para este caso de estudio es *relativo en %*.

Por último, se da clic en **OK** en la Figura 32, obteniendo como resultado el diagrama del porcentaje de potencia consumida durante el año, donde se puede evidenciar el perfil de consumo para cada tipo de semana en la acometida TIE-1, según se describe la Figura 34.

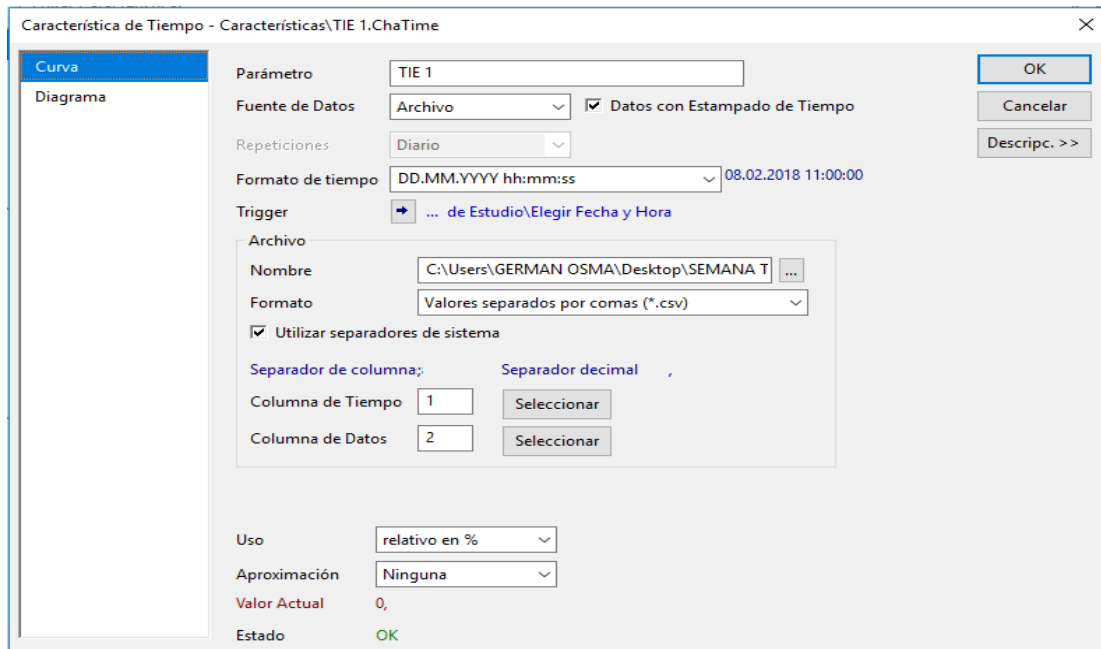


Figura 32. Configuración de la característica de tiempo para la carga TIE.

| | A | B | C | D | E | F | G |
|---|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | HORA | TIE-1 | TIE-2 | TIE-3 | TIE-4 | TIE-5 | TIE-6 |
| 2 | 01.01.2018 00:00:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 01.01.2018 01:00:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 01.01.2018 02:00:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 01.01.2018 03:00:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 01.01.2018 04:00:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 33. Archivo SemanaTIE.csv para el tablero de iluminación de emergencia.

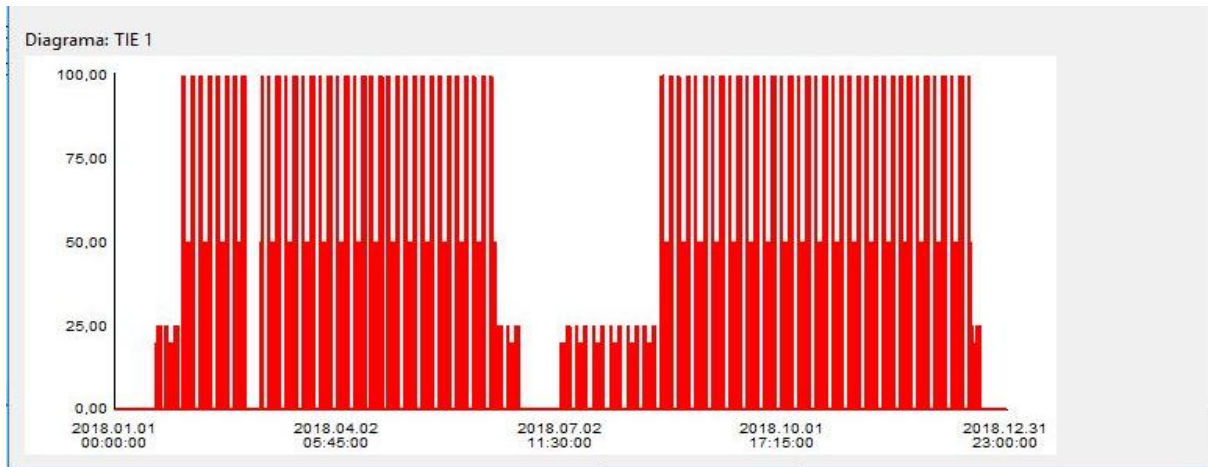


Figura 34. Resultado de característica de tiempo para la carga TIE del ramal 1.

Una vez agregados todos los escenarios de simulación de consumo de energía para una semana tipo uno, se comparó con el perfil real de consumo de energía, esto en los barrajes que atienden la totalidad de las cargas del Edificio como lo son barraje general de baja tensión - BGBT y barraje de transferencia, como se observa a continuación en las figuras 35 y 36.

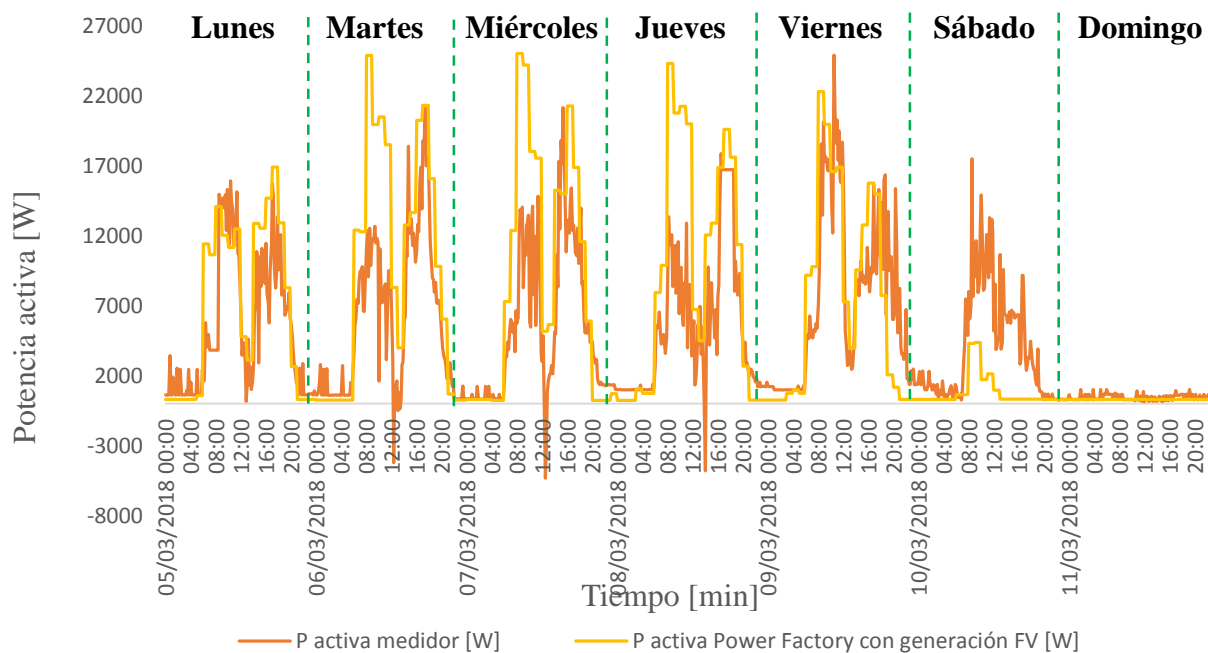


Figura 35. Curvas de modelado de demanda para el barraje general de baja tensión en una semana Tipo 1.

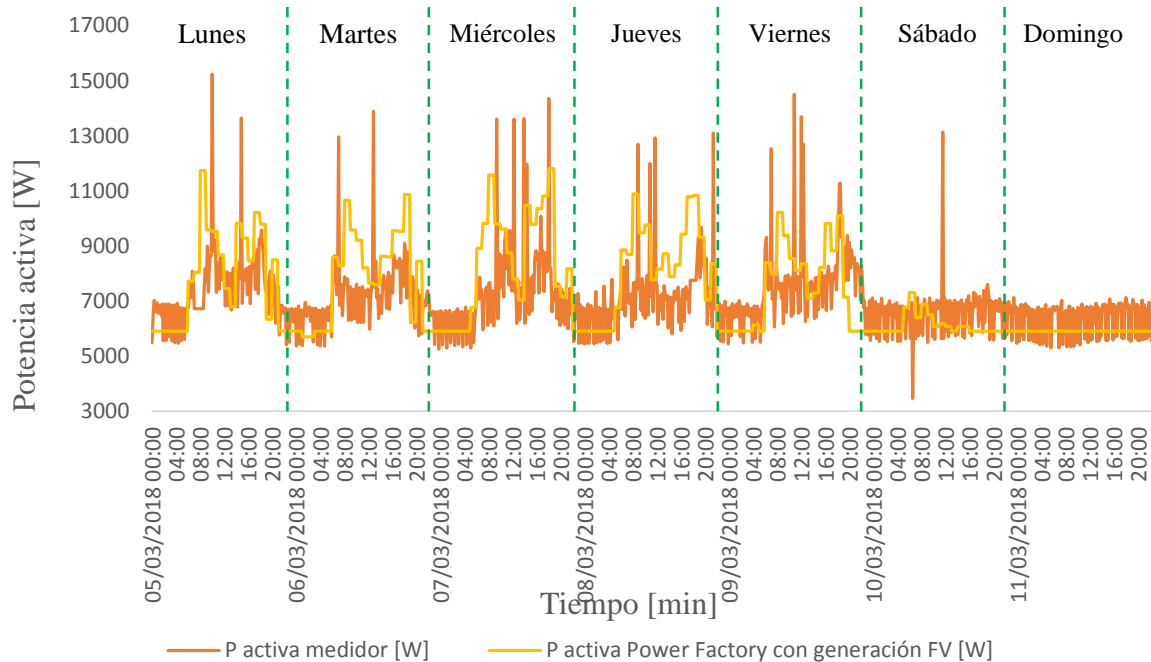



Figura 36. Curvas de modelado de demanda para el barraje de transferencia en una semana Tipo 1.

Estas gráficas evidencian que el perfil de potencia activa realizado para representar el Edificio de Ingeniería Eléctrica reproduce de forma adecuada el perfil de consumo real de energía. El escenario de barraje general de baja tensión -BGBT tiene un error promedio del 11% y el escenario de barraje de transferencia del 2%. Para los otros dos tipos de semana no se presentan curvas dado que no se cuenta con las mediciones reales de consumo para ser comparadas.

Además de establecer los escenarios de simulación, se necesita configurar para todas las cargas un *evento de carga*, este permite determinar el tiempo de la simulación. Su configuración se realiza a través del icono . Una vez se hace clic sobre este, se despliega la ventana mostrada en la Figura 37. Allí se seleccionó la opción de fallas múltiples y, por consiguiente, el recuadro de *agregar cargas*, donde se seleccionan todas las cargas que se les haya aplicado un escenario, con el fin de ser tomadas en cuenta durante el periodo de simulación cuasi dinámica.

4.4 Configuración de escenarios para sistemas fotovoltaicos en la herramienta simulación cuasi-dinámica

Para obtener una representación más exacta de la generación debida a los paneles FV, se adiciona los datos de la irradiación solar y la temperatura ambiente durante todo el año. Para esto, se siguen los pasos mostrados en la Figura 22 y ubicándose en la pestaña lateral izquierda de *Flujo de Carga* y pestaña superior *Datos ambientales* se obtiene una ventana como se muestran en la Figura 38, donde se presentan los parámetros de irradiancia en el plano horizontal y los factores ambientales. Para estas variables se agrega una *característica de tiempo* de manera similar como se agregó para la configuración del escenario de carga.

Evento de Carga - ...tos de la Simulación Cuasi Dinámica\Evento de Carga.EvtLod

Fuera de Servicio

Tiempo de Ejecución 1/01/2018 0:00:00 ...

OK

Cancelar

Cargas

Evento para

Carga Monofásica

Fallas Múltiples

Agregar cargas Eliminar Todo

Evento de Carga

Paso

Rampa

Paso de Carga Proporcional

Potencia Activa 0, %

Potencia Reactiva 0, %

Figura 37. Configuración para evento de carga.

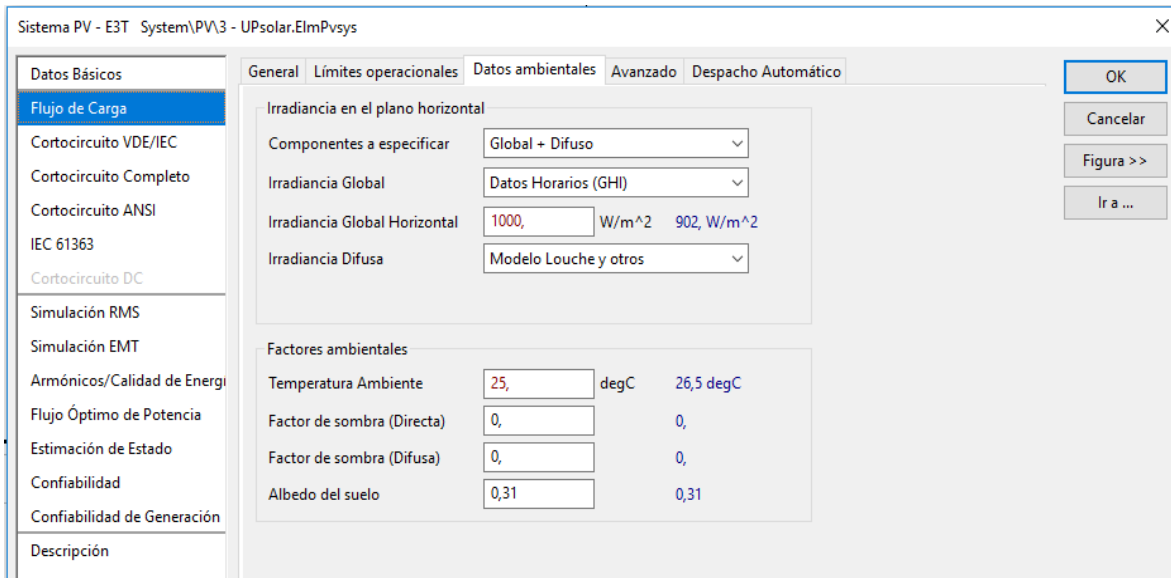



Figura 38. Configuración de características para radiación solar y temperatura ambiente en los paneles.

4.5 Configuraciones para realizar el cálculo de flujo de carga

Una vez se realizan las configuraciones de la red de baja tensión y los escenarios de simulación en PowerFactory, se procede a correr el flujo de carga dando doble clic en el icono  ubicado en la barra de herramientas, desplegando la ventana *Simulación Cuasi Dinámica* como se muestra en la Figura 39, de ahí se selecciona la opción *Flujo de carga AC, desbalanceado, trifásica (ABC)*; un periodo de tiempo de *Todo el Año* y un *Tamaño del Paso* de 1 con *Unidad* en horas.

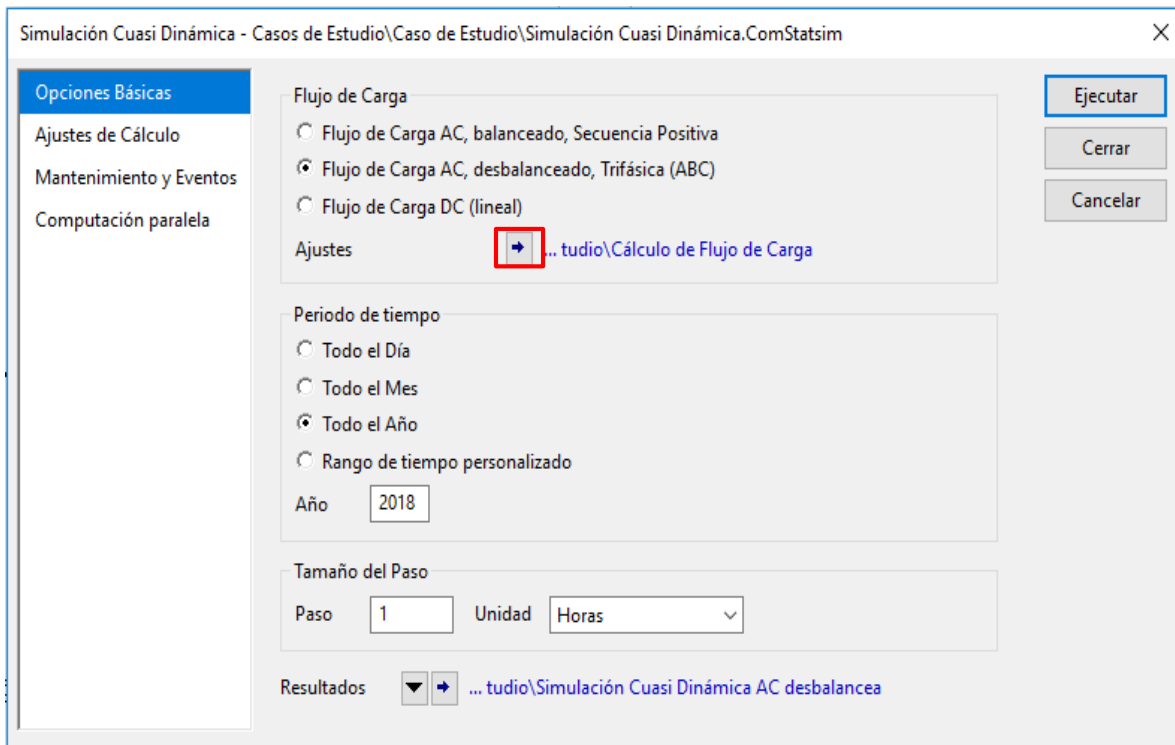


Figura 39. Ajustes del flujo de carga.

Un aspecto importante es habilitar la opción de *Considerar las cargas dependientes de la Tensión*, esto con el fin de tener presente en los cálculos de flujo de carga los modelos ZIP configurados en las cargas. Para esto, se debe hacer clic en la flecha de *Ajustes* de la Figura 39, esto despliega la ventana de la Figura 40.

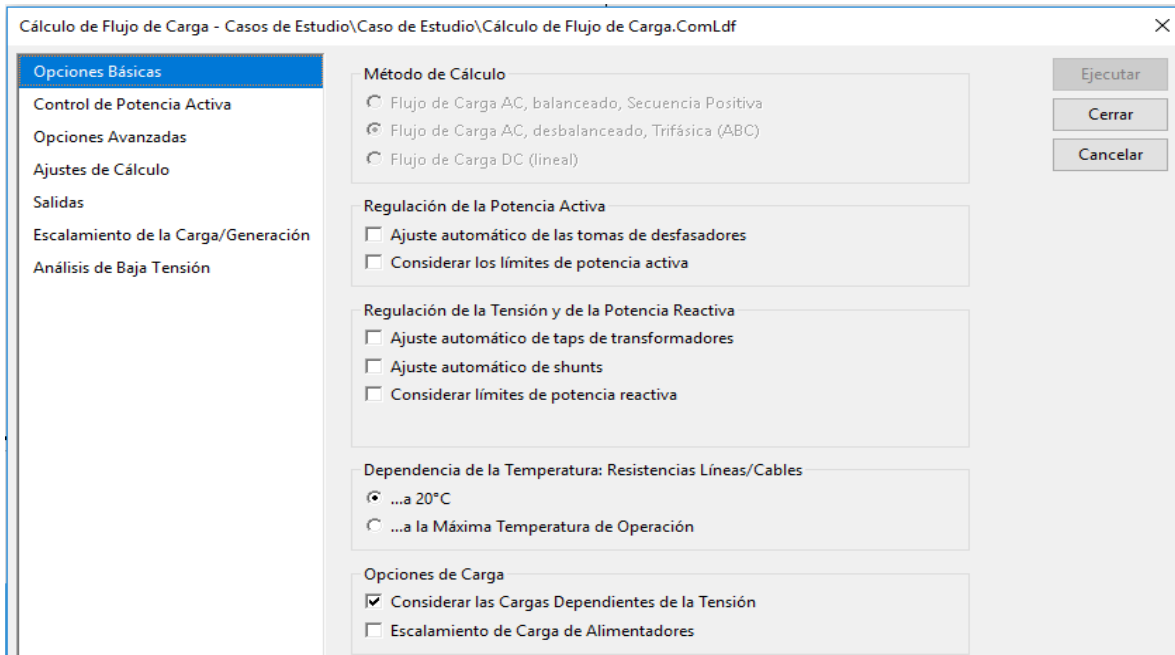


Figura 40. Ajustes del cálculo de Flujo de carga.

Por último, se debe configurar la precisión del cálculo, esto con el fin mejorar el resultado de la simulación, para realizar esta configuración se edita el *máximo error de flujo de carga aceptable* en el campo *Nodos*. Para este caso de estudio se tiene un error máximo de 0,00001kVA, como se puede observar en la Figura 41.

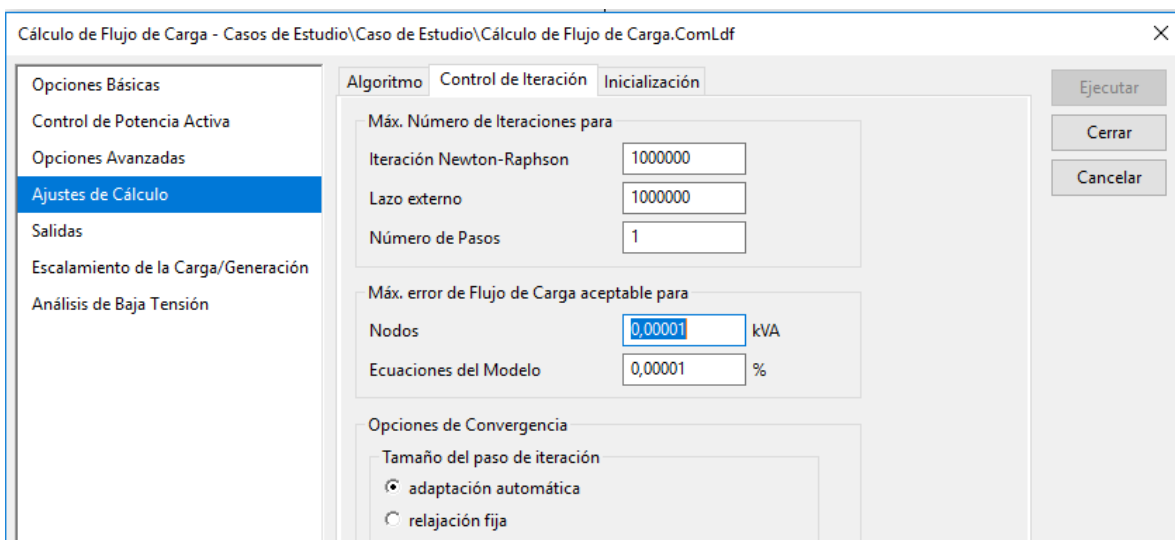


Figura 41. Ajustes de máximo error en el flujo de carga.

La Figura 42, presenta el diagrama de flujo de la metodología utilizada para la configuración del caso estudio en la herramienta de *simulación cuasi-dinámica* de PowerFactory.

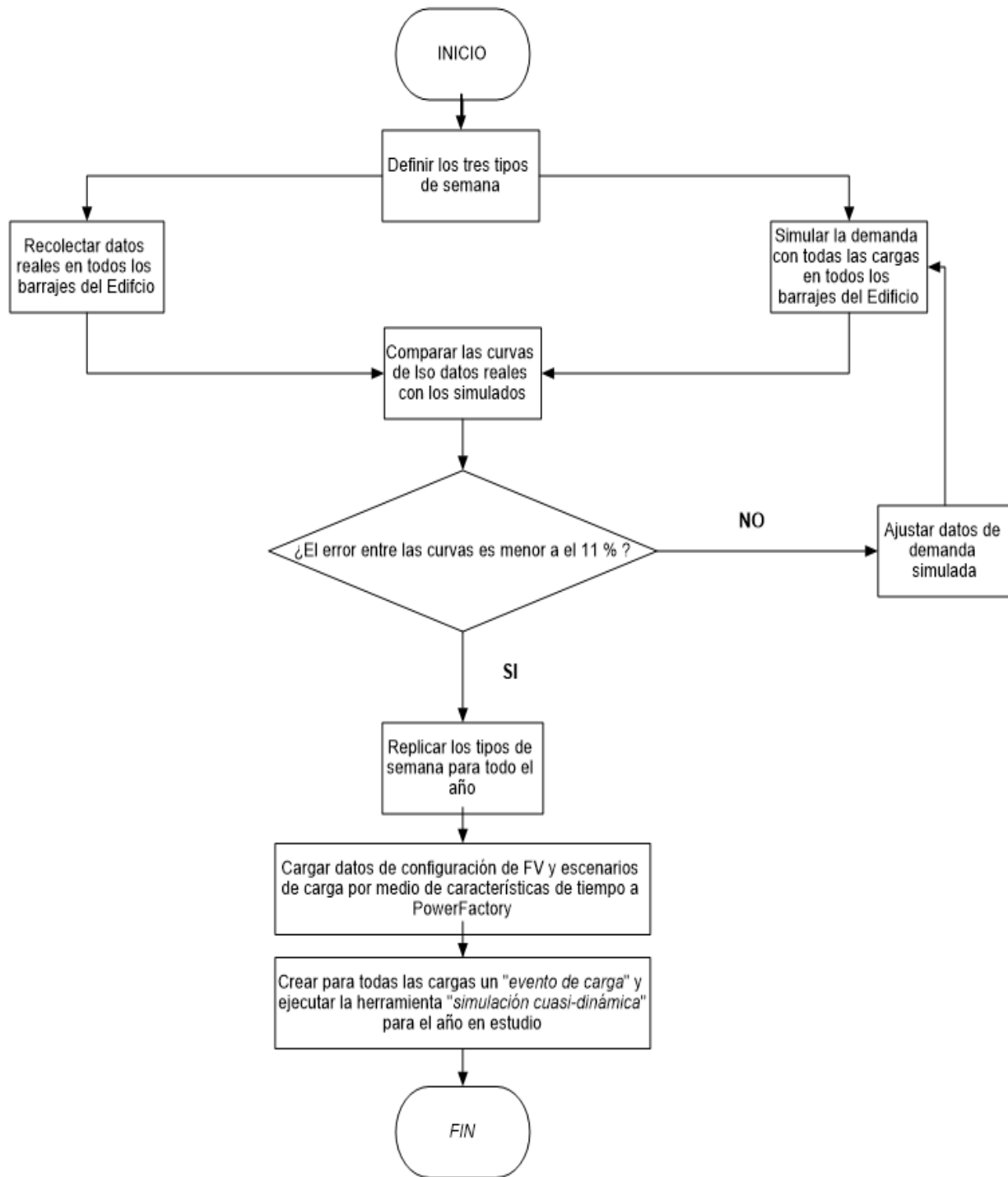


Figura 42. Diagrama de flujo de la metodología para programar una simulación cuasi-dinámica en PowerFactory.

5. Cuantificación de la variación potencial de los parámetros de caracterización del perfil de tensión y pérdidas de energía en los conductores

Este capítulo presenta el análisis de los resultados de simulación para los dos parámetros en cuestión, perfil de tensión y pérdidas de energía en los conductores. Para ello, se escogen los datos a utilizar, se aplican los indicadores de evaluación y, por último, se realiza el análisis para cada uno de estos parámetros.

5.1 Obtención de datos

La simulación cuasi dinámica permite extraer datos de tensiones, corrientes, cargabilidad, flujo de potencia, entre otros. El objeto de este estudio es analizar el impacto en el perfil de tensiones y pérdidas en conductores, por esta razón se seleccionaron los siguientes parámetros.

- Tensión de fase A a neutro (V_{an})
- Tensión de fase B a neutro (V_{bn})
- Tensión de fase C a neutro (V_{cn})
- Pérdidas totales de potencia en conductores (W)

PowerFactory permite extraer los datos obtenidos en formato .csv para cada parámetro de interés, para ello se debe definir los elementos del sistema a medir. Para el análisis de tensiones se seleccionan todos los barrajes trifásicos más significativos de la red eléctrica del Edificio, obteniendo un total de 12 barrajes.

Para examinar el índice de pérdidas se seleccionaron como elementos a medir todos los tramos de conductores que conforman la red eléctrica, obteniendo un total de 132 tramos de conductores, de los cuales se obtuvieron las pérdidas de energía del Edificio.

5.2 Indicadores de evaluación

Para el análisis de los datos obtenidos se requieren indicadores que permitan hacer un análisis comparativo de los parámetros de interés que se estudian en la red de baja tensión del Edificio con y sin conexión del SFV, los siguientes son los indicadores que se eligieron para tal fin.

5.2.1 Indicador para el perfil de tensiones. Para revisar el cambio en el perfil de tensiones cuando se conecta el SFV, se usa el indicador descrito en la ecuación (1) (Buitrago Arroyave & López Lezama, 2013).

$$\%IV = \left(\frac{V_L \text{ con } GD}{V_L \text{ sin } GD} - 1 \right) * 100 \quad (1)$$

Donde:

L , denota el circuito a analizar.

V , tensión en el elemento a analizar.

IV , índice de evaluación de tensión.

Un valor negativo en $\%IV$ indica que la tensión en el elemento analizado disminuye cuando está conectado el SFV, un valor positivo en $\%IV$ indica un aumento en la tensión del elemento analizado.

5.2.2 Indicador de pérdidas de potencia. Para realizar un análisis comparativo de pérdidas de potencia en la red de BT, se usarán las ecuaciones descritas por (2) y (3), las cuales indican si existe cambio en las pérdidas de potencia activa y reactiva en un circuito al integrar generación FV (Buitrago Arroyave & López Lezama, 2013).

$$IP = \frac{P_L^{loss} \text{ con } GD}{P_L^{loss} \text{ sin } GD} \quad (2)$$

$$IQ = \frac{Q_L^{loss} \text{ con } GD}{Q_L^{loss} \text{ sin } GD} \quad (3)$$

Donde:

L , denota el circuito a analizar

P^{loss} , pérdidas de potencia activa

Q^{loss} , pérdidas de potencia reactiva

IP , índice de evaluación de potencia activa

Para cuantificar la variación porcentual al implementar generación FV se aplican los índices descritos por las ecuaciones (4) y (5).

$$\%IP = (IP - 1) * 100 \quad (4)$$

$$\%IQ = (IQ - 1) * 100 \quad (5)$$

Un valor positivo en estos índices $\%IQ$, $\%IP$ indica que al conectar el SFV a la red, las pérdidas son mayores; un valor negativo representa una disminución de pérdidas; un valor igual a cero no representa un cambio en la red eléctrica.

5.2.3 Indicador de pérdidas de energía. Para realizar un análisis comparativo de pérdidas de energía en la red de BT, se usará la ecuación descrita por (6), la cual indica si existe cambio en las pérdidas de energía en un circuito al integrar generación FV.

$$\%IE = \left(\frac{E_L^{loss} \text{ con } GD}{E_L^{loss} \text{ sin } GD} \right) * 100 \quad (6)$$

Donde:

L , denota el circuito a analizar

E^{loss} , pérdidas de energía

IE , índice de evaluación de pérdidas de energía

Un valor positivo en estos índices $\%IE$ indica que al conectar el SFV a la red, las pérdidas son mayores; un valor negativo representa una disminución de pérdidas; un valor igual a cero no representa un cambio en la red eléctrica.

5.3 Perfil de tensión

Para analizar el parámetro de perfil de tensión, se estudió inicialmente el desbalance entre fases del sistema de BT, se obtuvieron los valores de tensión de cada una de las fases del TDP4, suponiendo un escenario de generación FV. Los datos fueron evaluados para tres rangos significativos de tiempo, entre estos está la semana Tipo 0 que cuenta desde el día 01/01/2018 hasta el día 07/01/2018, la semana Tipo 1 desde el día 5/02/2018 hasta 11/02/2018 y para la semana Tipo 2 desde el día 22/01/2018 hasta el día 28/01/2018.

La Figura 43 presenta la tensión línea-neutro en el TDP4 para cada una de las fases, en esta se observa un desbalance significativo entre las fases, este comportamiento se presenta dado que la fase A cuenta con más carga instalada que las fases B y C, tal motivo promueve a hacer un análisis por separado de cada fase.

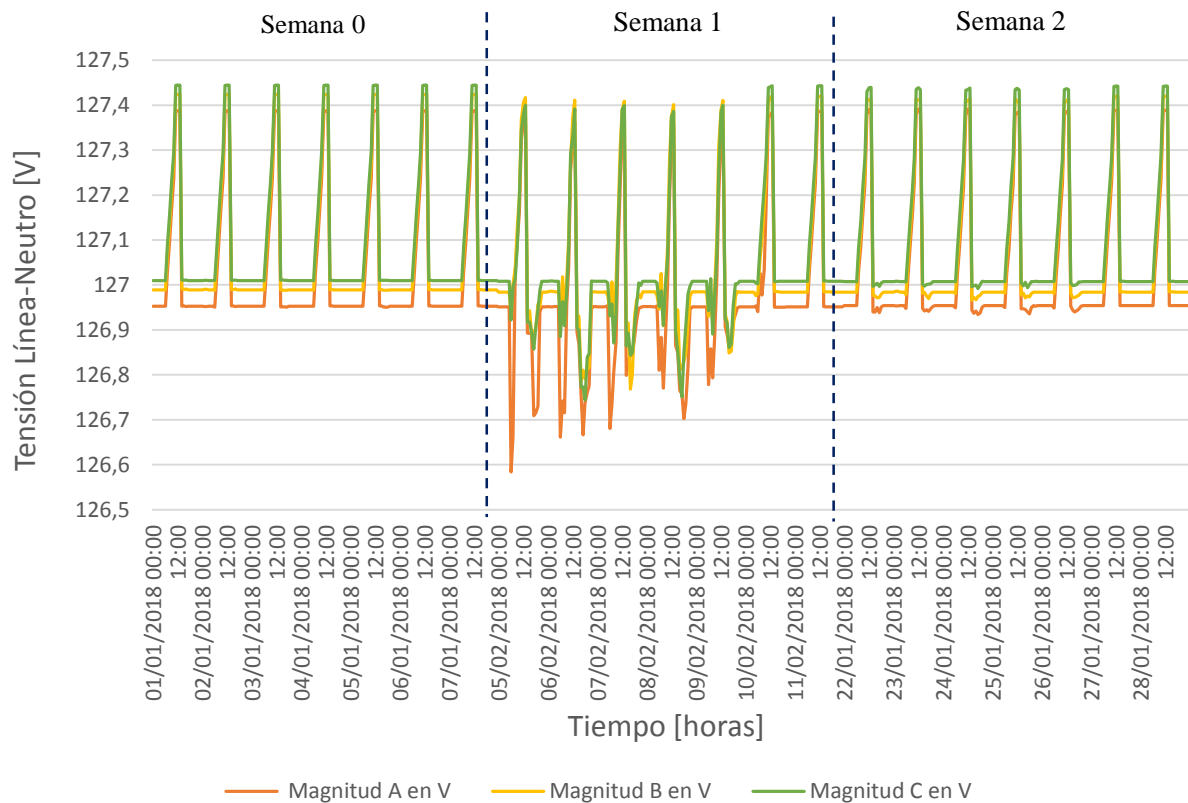


Figura 43. Perfil de tensión Línea-Neutro [V] en el TDP4.

Posteriormente, se evaluó el impacto que ocasiona la irradiación solar y la demanda de las cargas en el TDP4, esto con el fin de cuantificar cuál de estos dos factores produce una variación más significativa en el perfil de tensión. Para esto, se simularon tres tipos de escenarios; el primero, un escenario donde se esté inyectando energía FV y sin presencia de cargas en el barraje TDP4 (CFSC); el segundo, cuando se tenga presencia tanto de generación FV como de cargas en el barraje TDP4 (CFCC) y, por último, un escenario donde no se esté inyectando energía FV y sí se cuenta con el consumo de las cargas del TDP4 (SFCC). Estos escenarios fueron analizados en el instante de tiempo en el que se presentó un mayor consumo y una mayor generación de FV, es decir, para la semana Tipo 1 y para una potencia pico de 25 kW. El indicador (6) es el resultado de modificar el indicador de evaluación (1), ya que para el escenario base se tomó la tensión real

en que se encuentra el barraje TDP4 sin ninguna alteración, es decir, cuando no se presenta energía FV ni cargas conectadas a dicho barraje (SFSC) y los escenarios a analizar son CFSC, CFCC y SFCC.

$$\%IV = \left(\frac{Vl (\text{escenario a analizar})}{Vl (\text{escenario SFSC})} - 1 \right) * 100 \quad (6)$$

Donde:

L , denota el circuito a analizar.

V , tensión en el elemento a analizar.

IV , índice de evaluación de tensión.

Las figuras 44, 45 y 46 presentan el porcentaje de impacto en el perfil de tensión para los escenarios CFCC, CFSC y SFCC respectivamente, con esto, se puede concluir que las cargas así estén en su punto de mayor demanda no afectan de manera considerable el perfil de tensiones, si se compara con la inyección de generación FV. Esto se observa en el escenario CFSC dado que en este el impacto en el perfil de tensión llega aproximadamente al 0,8%, en contraste con el escenario SFCC en el cual se tiene un impacto más bajo del 0,35%. A partir de estos resultados, los siguientes análisis y gráficas se realizaron para una semana específica, en este caso se realizó sobre la semana Tipo 1, debido a que es la semana que aporta un mayor impacto en la red de BT del Edificio.

Además de seleccionar el tipo de semana se definió la semana a analizar, la cual fue la utilizada para sintonizar el flujo de carga de la red de BT del Edificio, dicha semana fue del 5 al 11 de

febrero del 2018 dado que cuenta con la característica de cuya irradiancia solar durante cada día es similar a la que usualmente se registra en Bucaramanga a lo largo del año.

Es importante resaltar la diferencia encontrada en el comportamiento del lunes con respecto a los demás días de la semana. Esto se debe a que no se presentó la misma tendencia de disminución en la irradiación solar en el horario de medio día como se muestra en los demás días, además de esto, durante la tarde del sábado y el domingo no se observan caídas de tensión a causa de la ausencia de cargas.

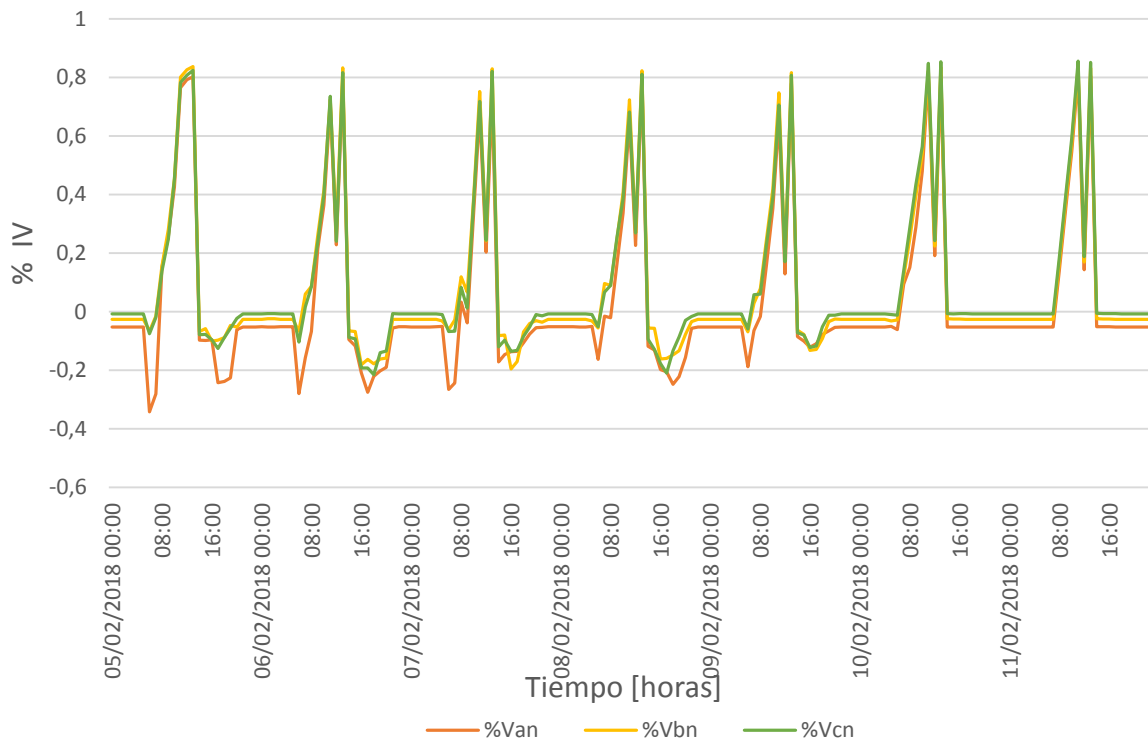


Figura 44. Porcentaje de impacto en el perfil de tensión del escenario CFCC.

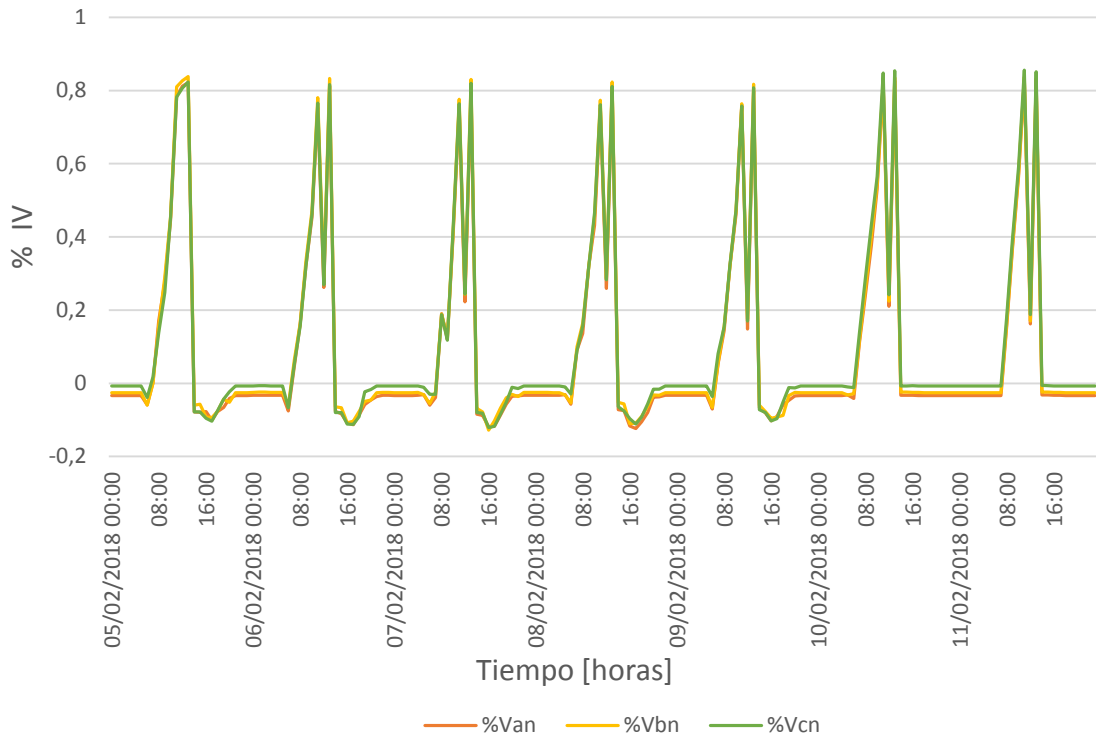


Figura 45. Porcentaje de impacto en el perfil de tensión del escenario CFSC.

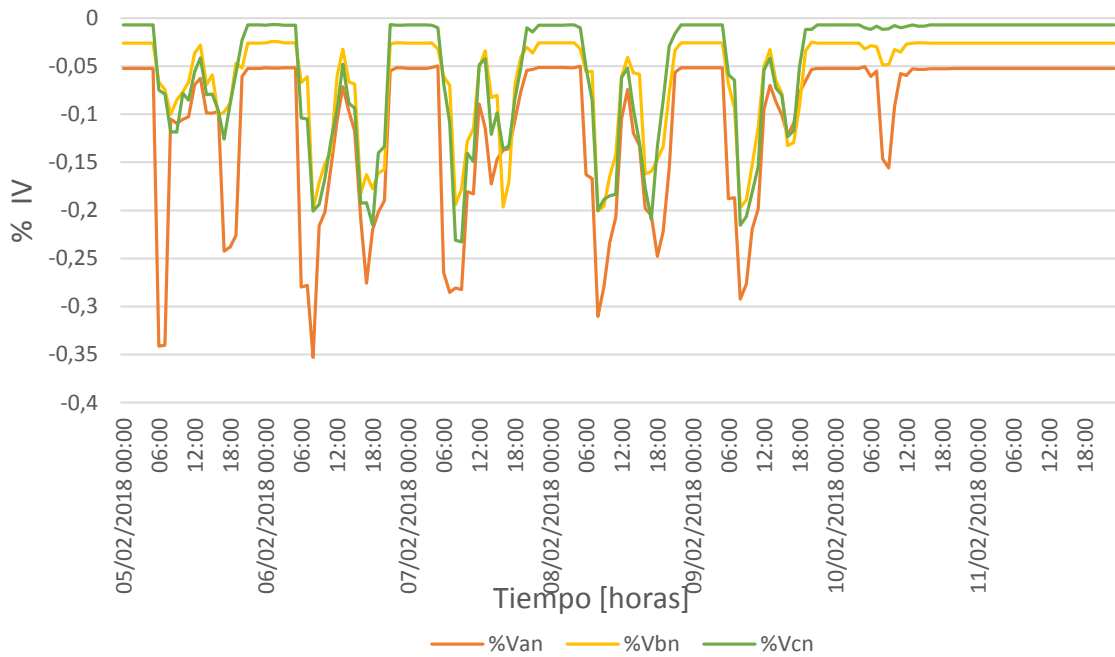


Figura 46. Porcentaje de impacto en el perfil de tensión del escenario SFCC.

En total, se tuvieron en cuenta cinco escenarios de simulación configurados por la variación de capacidad instalada de generación FV, estos son 5 kW, 10 kW, 15 kW, 20 kW y 25 kW. Las figuras 47, 48 y 49 presentan las tensiones de fase en el TDP4 a lo largo de una semana. De acuerdo con éstas, se evidencia un aumento en el perfil de tensión ante las diferentes variaciones de capacidad instalada de los generadores FV y en ninguno de los casos exceden los límites establecidos para Colombia en BT según la Norma Técnica Colombiana NTC 1340 y la resolución CREG 095⁵. Aun así, teniendo en cuenta la irradiación solar de todo el año no se presenta una tensión fuera de los límites establecidos, la Tabla 9 muestra los valores máximos y mínimos de tensión teniendo en cuenta todo el año, para el caso real de 10 kW de capacidad instalada. También se observa en esta tabla que la Fase A presenta los valores de tensión más bajos, ya que esta fase se cuenta con mayor carga en comparación con las fases B y C.

Teniendo en cuenta los datos de irradiación solar, se presenta generación FV en el horario entre las 7:00 y 17:00 horas, por lo tanto, este es el rango considerado en los análisis que se presentan en este capítulo.

⁵ Establecen una tensión máxima del +5% de la nominal y una tensión mínima de -10% de la nominal.

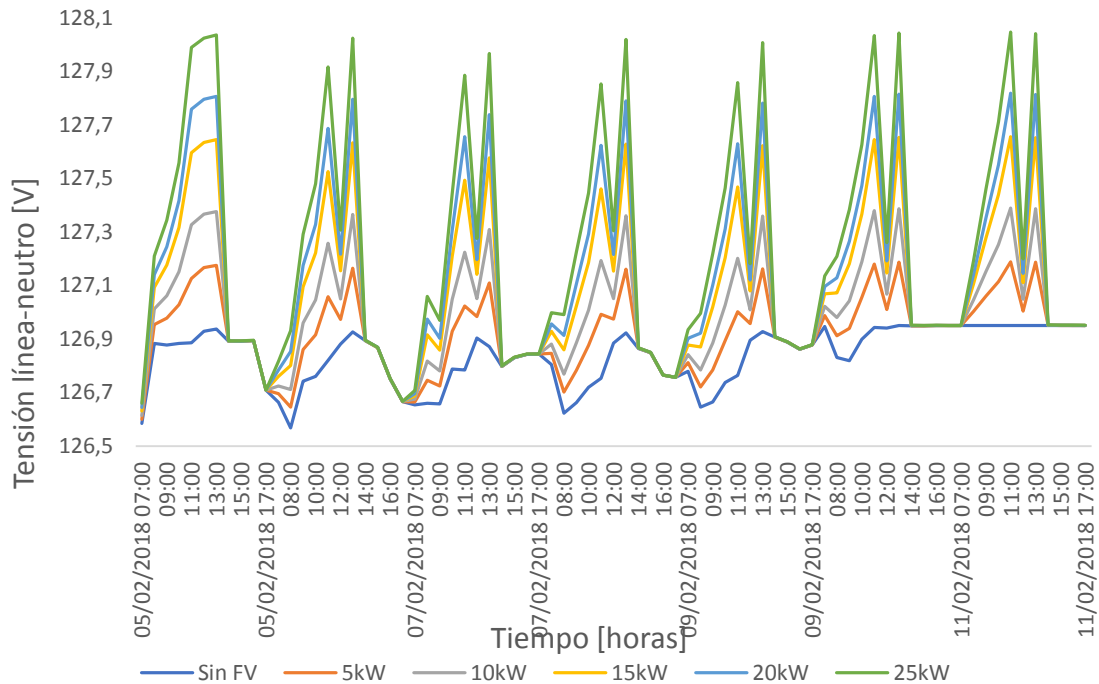


Figura 47. Tensión Línea- neutro, fase A para el barraje TDP4.

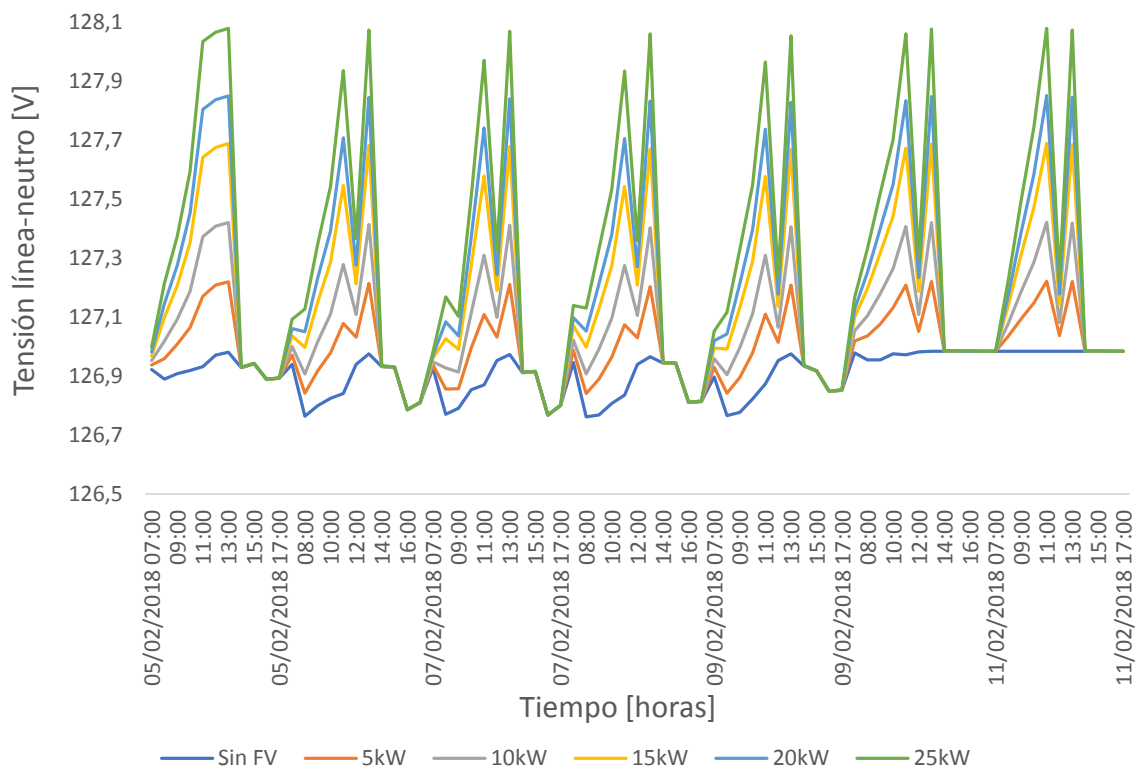


Figura 48. Tensión Línea- neutro, fase B para el barraje TDP4.

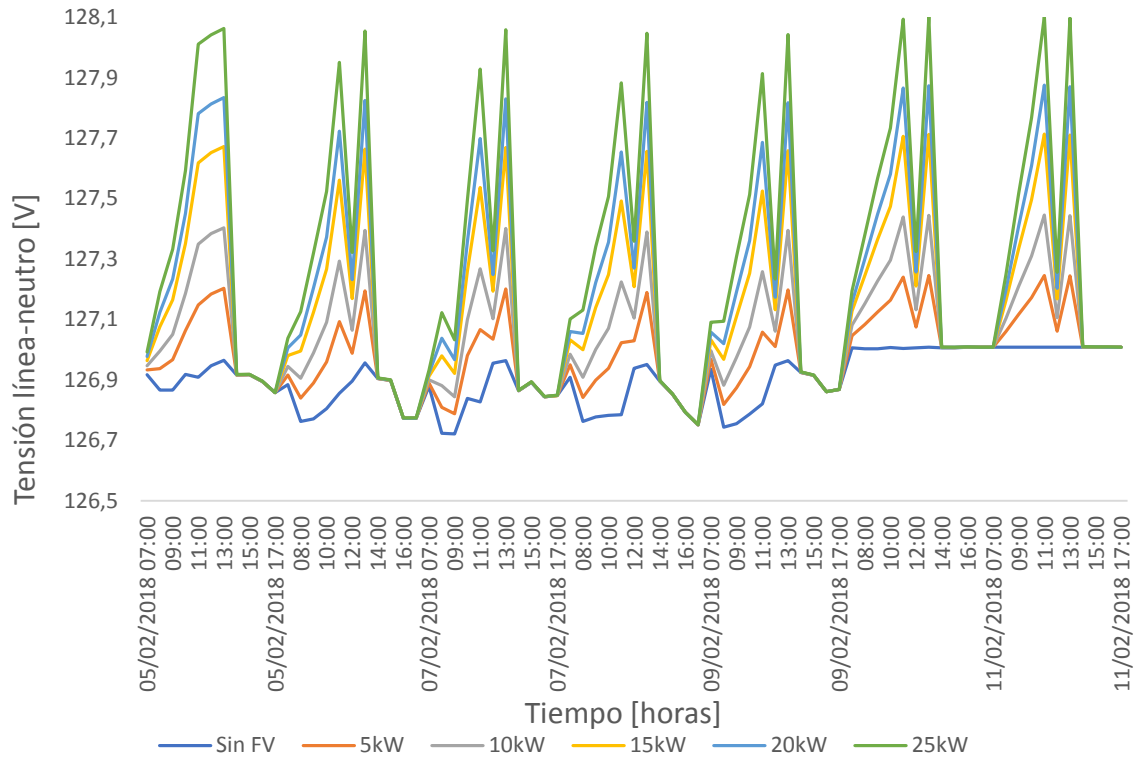


Figura 49. Tensión Línea- neutro, fase C para el barraje TDP4.

Tabla 9.
Tensión mínima y máxima en el TDP4.

| Fase | Tensión máxima línea-neutro [V] | Tensión mínima línea-neutro [V] |
|------|---------------------------------|---------------------------------|
| A | 127,3995 | 126,5684 |
| B | 127,4338 | 126,7641 |
| C | 127,4547 | 126,7236 |

Según simulaciones realizadas para que se presente una sobretensión en el Edificio, se debe considerar aproximadamente 143 kW de capacidad instalada.

En este estudio se analizó el impacto ocasionado por la generación FV en el perfil de tensión, considerando el indicador (1) mencionado. Las figuras 50, 51 y 52 muestran el porcentaje de impacto cuando se inyecta energía FV ante los diversos escenarios de capacidad instalada, se evidencia un aumento en el perfil de tensión en las tres fases conforme se incrementa la capacidad instalada.

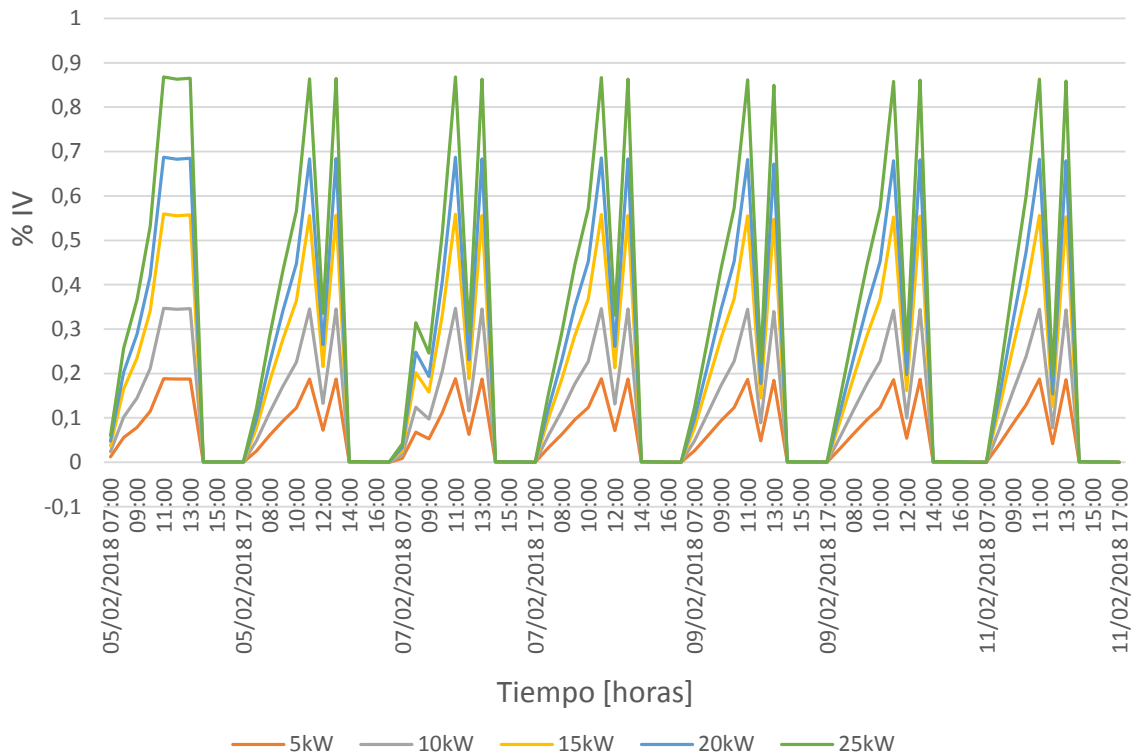


Figura 50. Indicador de variación, Fase A para el barraje TDP4.

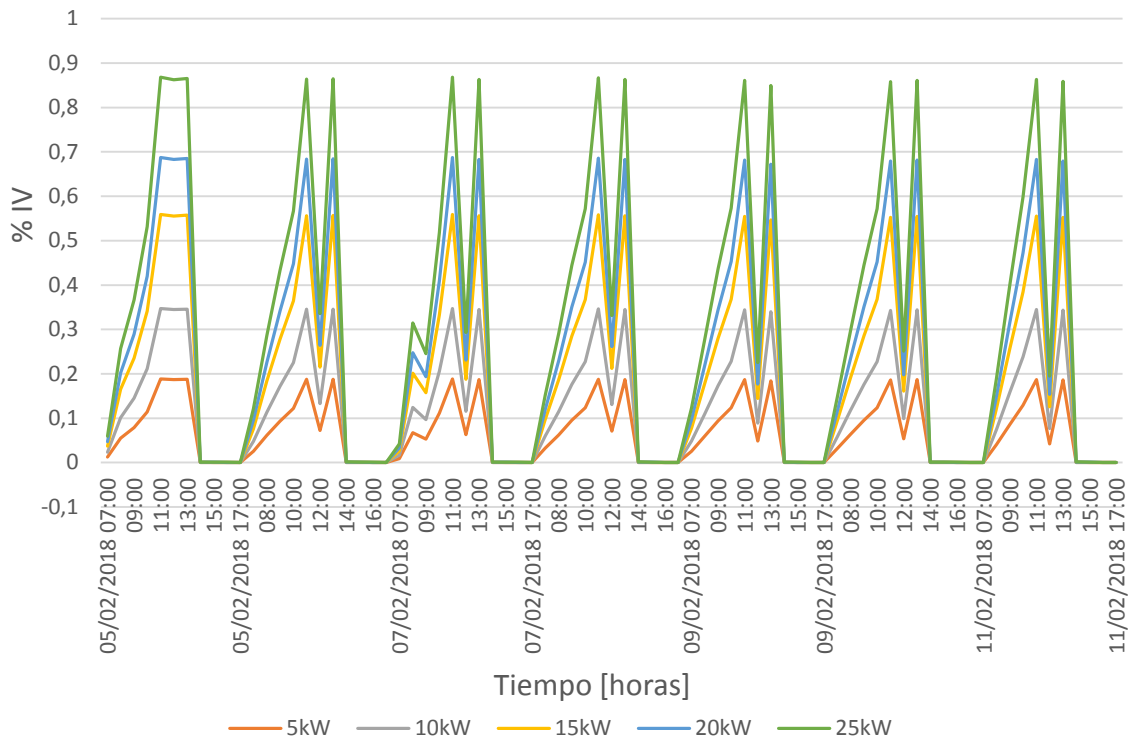


Figura 51. Indicador de variación, Fase B para el barraje TP4.

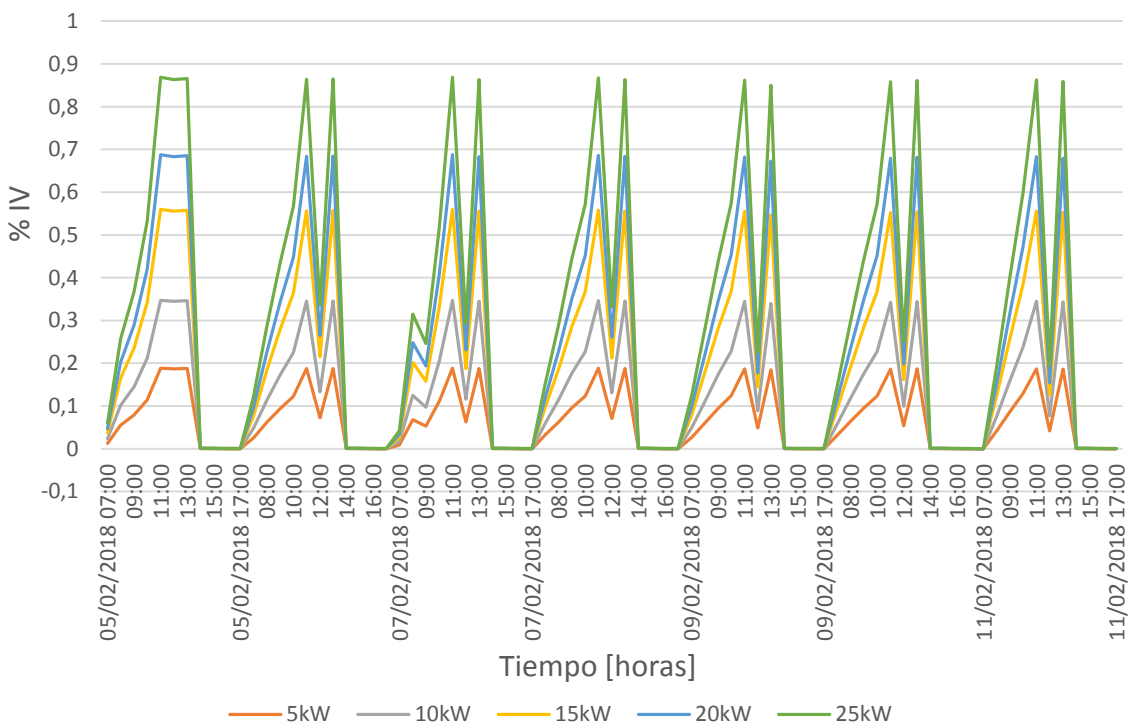


Figura 52. Indicador de variación, Fase C para el barraje TDP4.

La Figura 53 muestra los máximos porcentajes de variación en el perfil de tensión que se encontraron para cada uno de los escenarios de capacidad instalada.

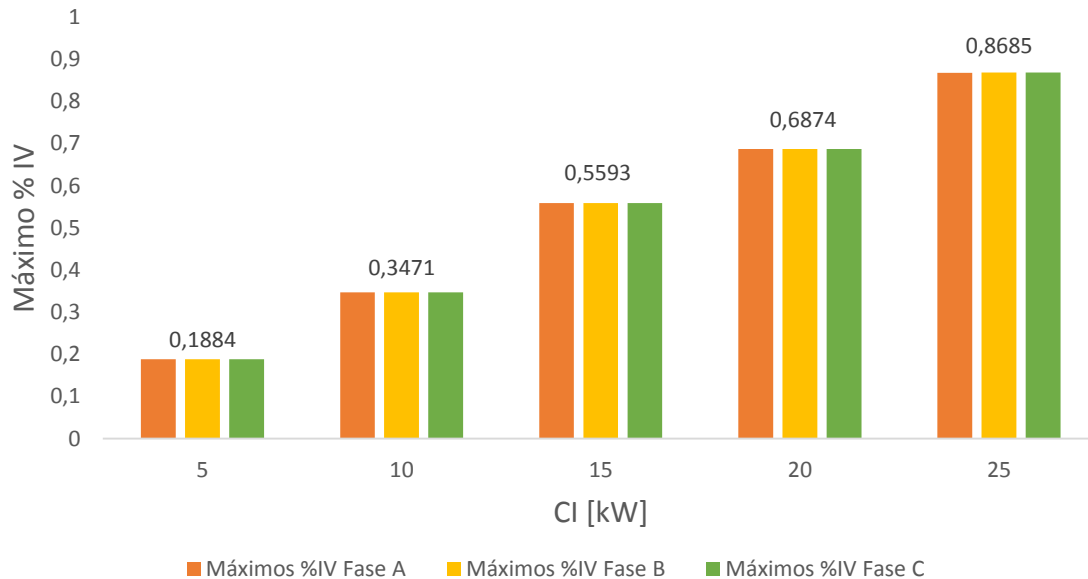


Figura 53. Máximos porcentajes de variación ante diferentes escenarios de capacidad instalada de energía FV.

En la Figura 53, se observa que las tres fases presentan un impacto semejante en el perfil de tensión para una misma capacidad instalada, esto evidencia la inyección balanceada de los paneles FV del Edificio. Este impacto tiene un porcentaje promedio de 1,4% entre un escenario y otro. Para el caso real, es decir, 10 kW se tiene aumento máximo del 0,347% en el perfil de tensión.

Otro análisis que se realizó fue el impacto que presenta la irradiación solar - RS en el perfil de tensión del TDP4. Para ello, se realizaron tres simulaciones de la red de BT del Edificio, manteniendo una temperatura ambiente constante (21,4°C) y variando la irradiación solar anual (200 W/m², 500 W/m² y 1000 W/m²).

En las figuras 54, 55 y 56 se muestran los máximos porcentajes de variación para las fases A, B y C, respectivamente. Al comparar los resultados del caso real respecto al caso de mayor capacidad instalada, se encontró una diferencia del 0,46% para una irradiación solar de 200 W/m²,

0,52% para 500 W/m^2 y 0,53% para 1000 W/m^2 , con esto se halla que al aumentar la irradiancia sobre los 500 W/m^2 el porcentaje de impacto no crece de manera lineal, lo cual evidencia que para una irradiancia constante durante todo un día de 1000 W/m^2 , la cual se aproxima a la máxima irradiancia presentada en Bucaramanga durante un año, genera un impacto que no es representativo en el perfil de tensiones.

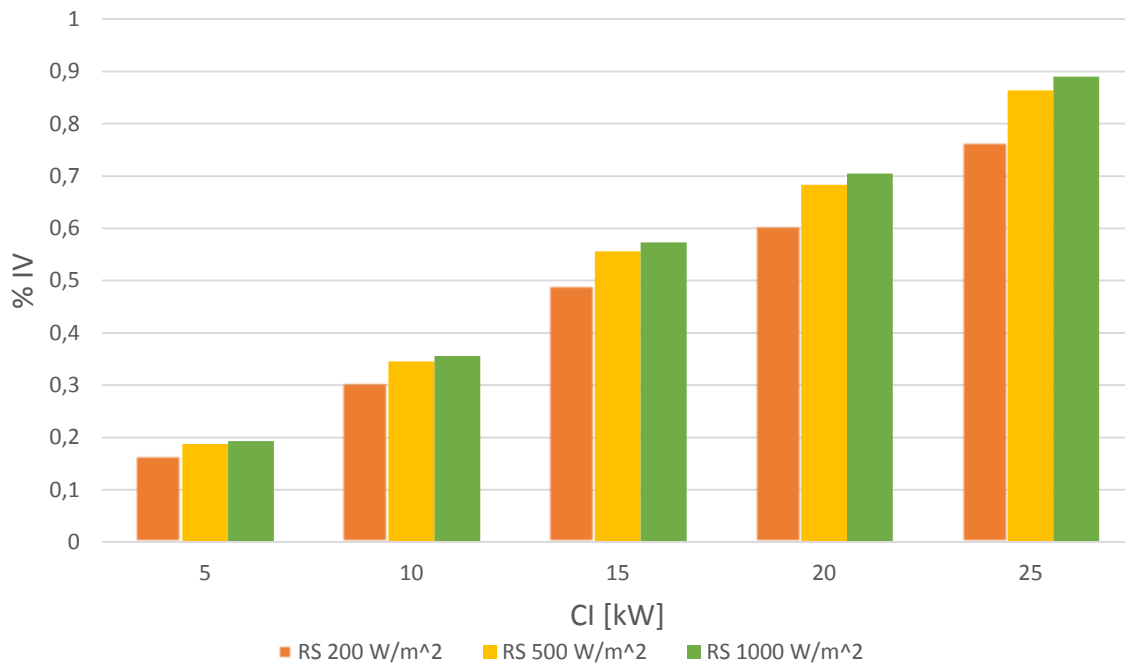


Figura 54. Máximo porcentaje de variación de tensión en la Fase A para diferentes escenarios de capacidad instalada de generación FV.

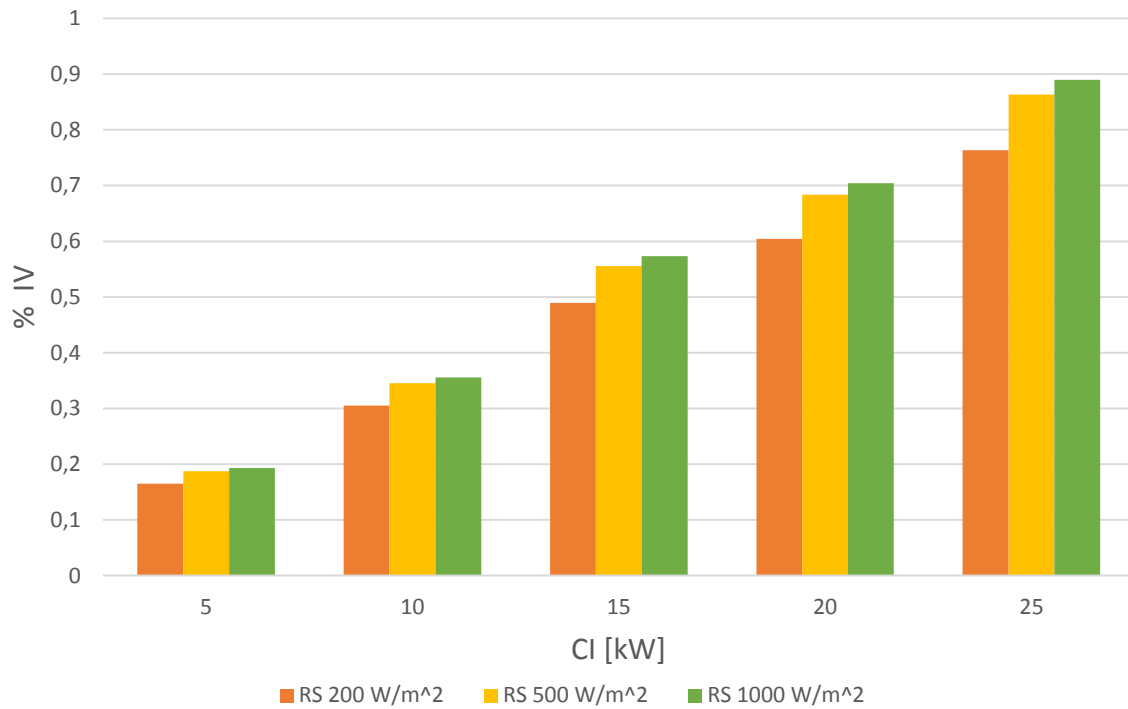


Figura 55. Máximo porcentaje de variación de tensión en la Fase B para diferentes escenarios de capacidad instalada de generación FV.

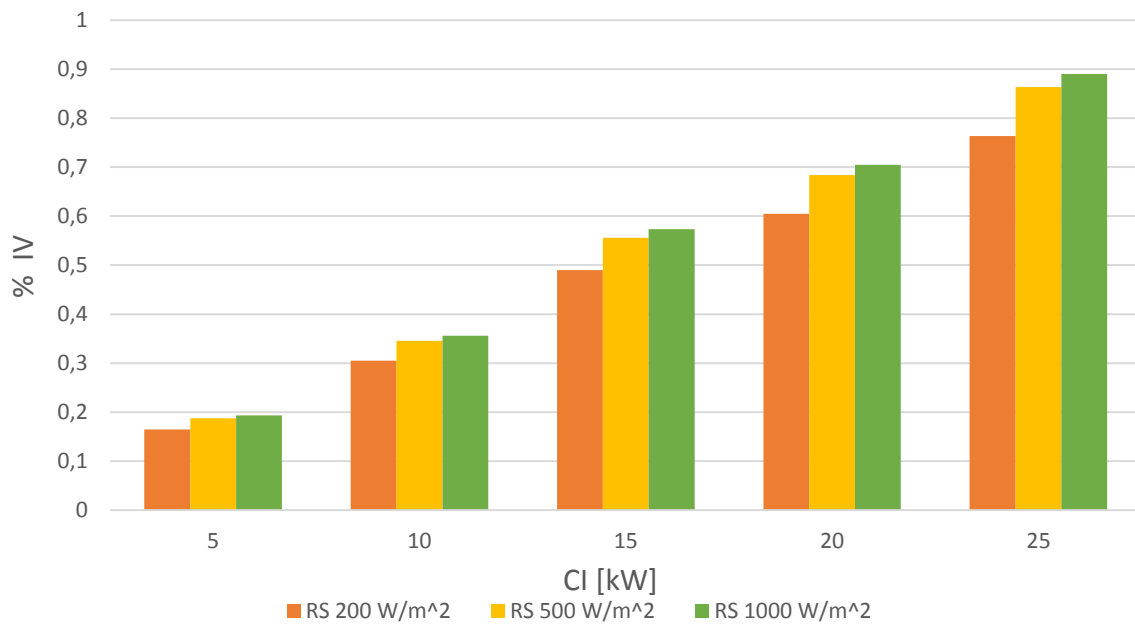


Figura 56. Máximo porcentaje de variación de tensión en la Fase C para diferentes escenarios de capacidad instalada de generación FV.

En la Figura 57 se puede observar de forma más detallada el comportamiento que tiene la tensión ante diversos valores de irradiancia y capacidades instaladas de generación FV. En ésta se evidencia que después de un determinado nivel de irradiancia su comportamiento lineal tiene una pendiente menor.

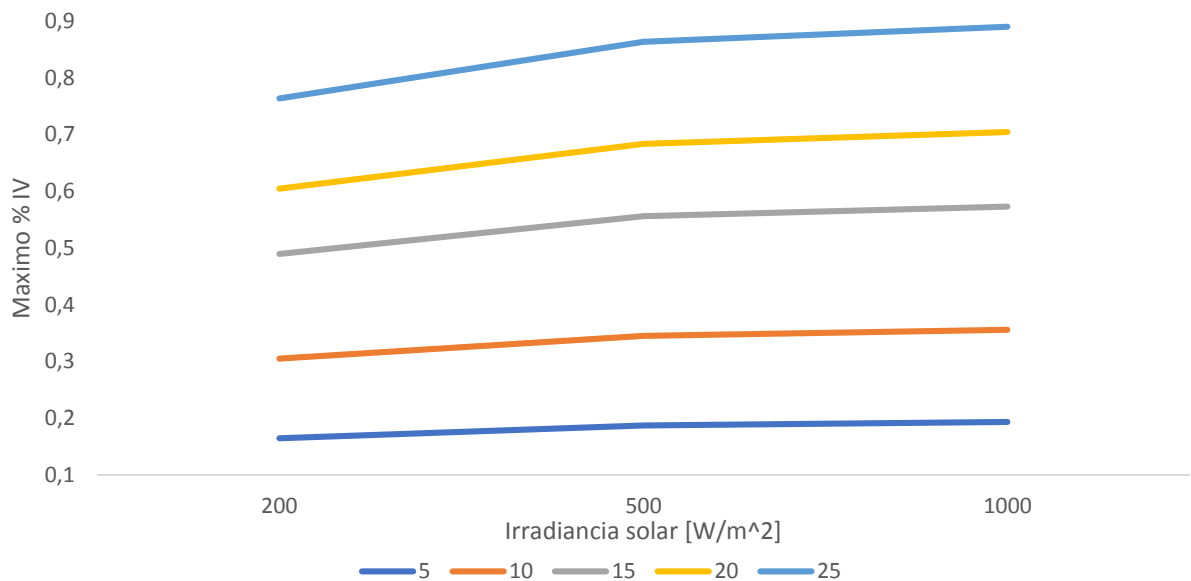


Figura 57. Comportamiento de la tensión ante diversas irradiancias y capacidades instaladas de generación FV.

Una vez analizado el TDP4, se realizó una comparación respecto a los demás tableros principales de la red de BT del Edificio. Para este análisis se tomó en cuenta una capacidad instalada de 10 kW (caso real) dado que se presenta el mismo comportamiento de aumento a medida que se incrementa las demás capacidades instaladas. La Figura 58 muestra los porcentajes de variación para los tableros más importantes de la red de BT del Edificio aplicando el indicador (1).

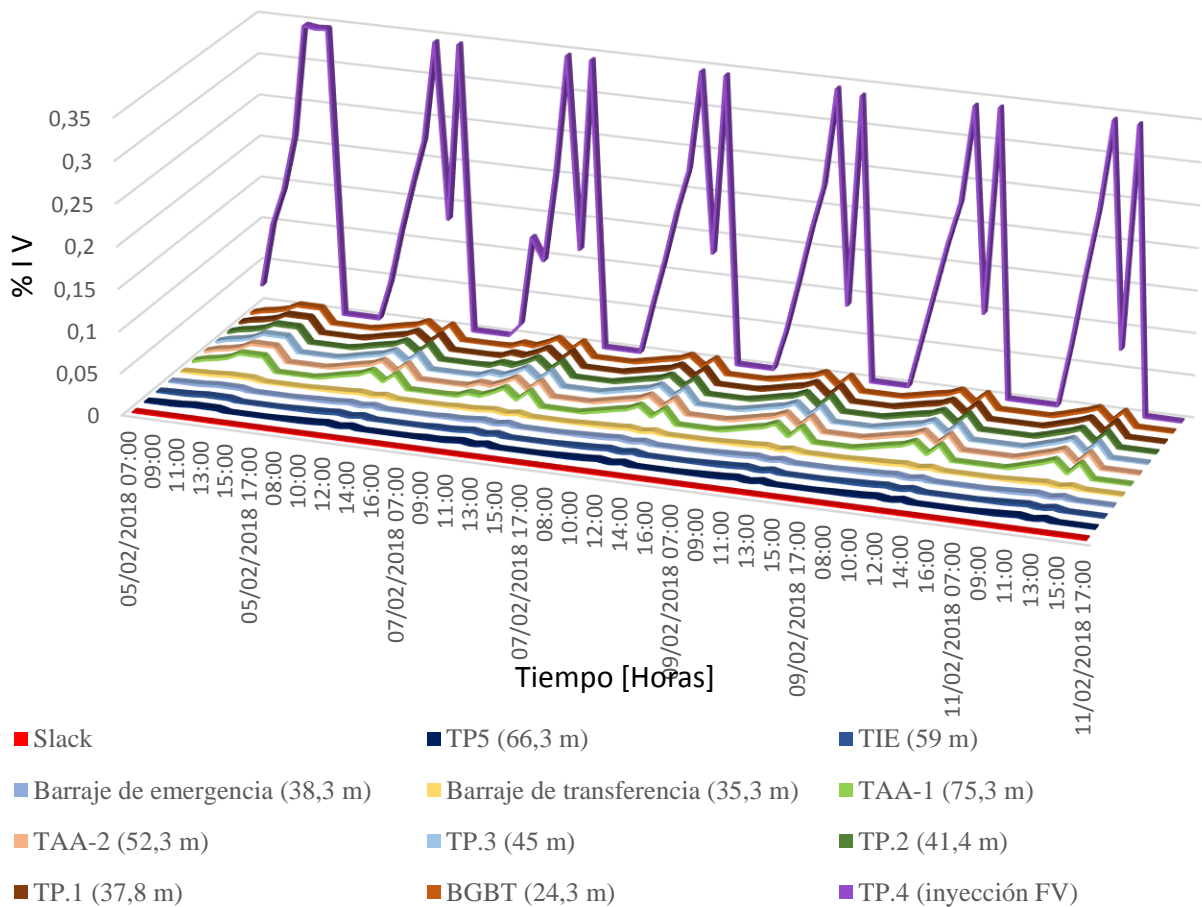


Figura 58. Impacto en los tableros de la red de BT al inyectar generación FV, con capacidad instalada de 10kW y tensión de la fase A.

En la gráfica se aprecia que la barra Slack no presenta un impacto representativo al inyectarse energía FV, dado que no hay un excedente de energía que se transfiera a la red de media tensión; en el TDP4, se presenta el máximo aumento en el perfil de tensión, puesto que allí es donde se conecta el SFV a la red del Edificio, en este punto se llega hasta 0,3471 % de impacto sobre el perfil de tensión.

Para los barrajes principales de la red, se observan dos perfiles de impacto en la tensión, el primero con un valor máximo 0,0181% corresponde al BGBT, el segundo con un valor máximo

de impacto de 0,0032% correspondiendo al barraje de transferencia, los cuales están ubicados a 24,3 m y 35,5 m respectivamente del punto de conexión del SFV, con esto se evidencia que los puntos que presentar un mayor impacto en el perfil de tensiones son aquellos que están más cercanos al punto de conexión del SFV.

Los tableros que se derivan de los barrajes principales, como tableros de piso, aires acondicionados, iluminación de emergencia, luminarias, tomas normales y regulados, presentan un impacto menor al barraje que están conectados, debido a la longitud del conductor, la cual produce caída de tensión respecto a su punto de conexión.

5.4 Pérdidas en conductores

Las distancias que conforman las acometidas de la red eléctrica de BT del Edificio son cortas, esto hace que la componente reactiva sea despreciable, por tal motivo, sólo se analizó las pérdidas de energía activa.

Se realizó un análisis que evalúa las pérdidas de energía de los conductores que conforman el SFV, para este caso en específico, se tienen 4 tramos trifásicos:

- Tramo 1: Línea trifásica desde el barraje del sistema fotovoltaico hasta el tablero de distribución del Piso 4 (BSFV-TDP4).
- Tramo 2: Línea trifásica desde el barraje del sistema fotovoltaico hasta el arreglo SFV1 (SFV18-01).
- Tramo 3: Línea trifásica desde el barraje del sistema fotovoltaico hasta el arreglo SFV2 (SFV18-02).
- Tramo 4: Línea trifásica desde el barraje del sistema fotovoltaico hasta el arreglo seguidor solar (seguidor solar).

La Tabla 10 evidencia las pérdidas de energía por los conductores del SFV en el año de estudio presentando un incremento de pérdidas conforme se aumenta la capacidad instalada, esto es debido al aumento de corriente que se debe transportar por los conductores. En la Figura 59, se observa que las pérdidas de todo un año, en este caso de estudio, tienen un porcentaje bajo en comparación con la generación total de los SFV y presenta una tendencia lineal positiva con pendiente de 0,225. Para el caso real de 10 kW se tiene un porcentaje de pérdidas del 0,46%.

Tabla 10.

Valores de potencia y pérdidas activas del SFV en el año 2018.

| Capacidad instalada [kW] | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|--|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Energía generada del SFV [kWh/año] | 7129, 73 | 13189, 61 | 21398, 30 | 26383, 23 | 33516, 50 |
| Pérdidas de energía del SFV [kWh/año] | 17,37 | 61,46 | 155,83 | 241,82 | 383,25 |
| Porcentaje de energía perdida por las acometidas durante todo el año [%] | 0,24 | 0,46 | 0,72 | 0,91 | 1,14 |

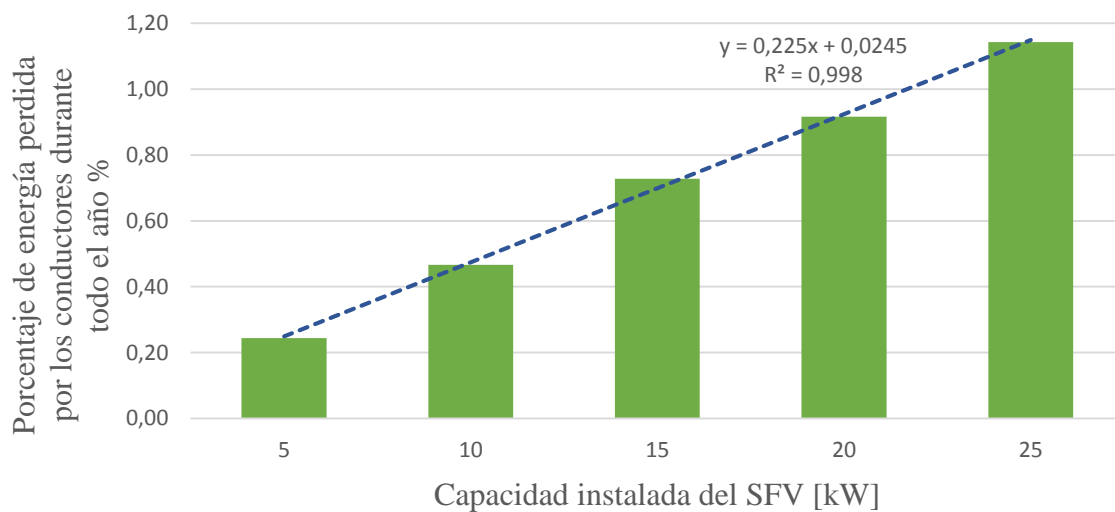


Figura 59. Pérdidas de energía activa del SFV durante el año 2018.

A continuación, se presentan los resultados del análisis de pérdidas durante todo el año considerando los conductores de la red de BT del Edificio que más impacto presentan, esto con el fin de observar si aumentan o disminuyen las pérdidas en estas líneas. Para esto se aplica el indicador de evaluación (6), donde se obtiene el porcentaje del indicador de pérdidas de energía (% IE).

Al igual que los conductores del SFV, la línea que une el TDP4 y el BGBT presenta un aumento significativo en las pérdidas de energía activa, esto se debe a que es la única línea que permite la conexión entre el SFV y la red de BT del Edificio, lo cual provoca un aumento de la corriente que transportan los conductores y consigo las pérdidas de energía. Este aumento excesivo en las pérdidas de energía se debe a que, cuando se incrementa la capacidad instalada de generación FV la corriente que transporta esta línea empieza a ser mayor a la cual fue dimensionada, lo que influye directamente en las pérdidas presentes en la línea. Esto se evidencia en la Figura 60.

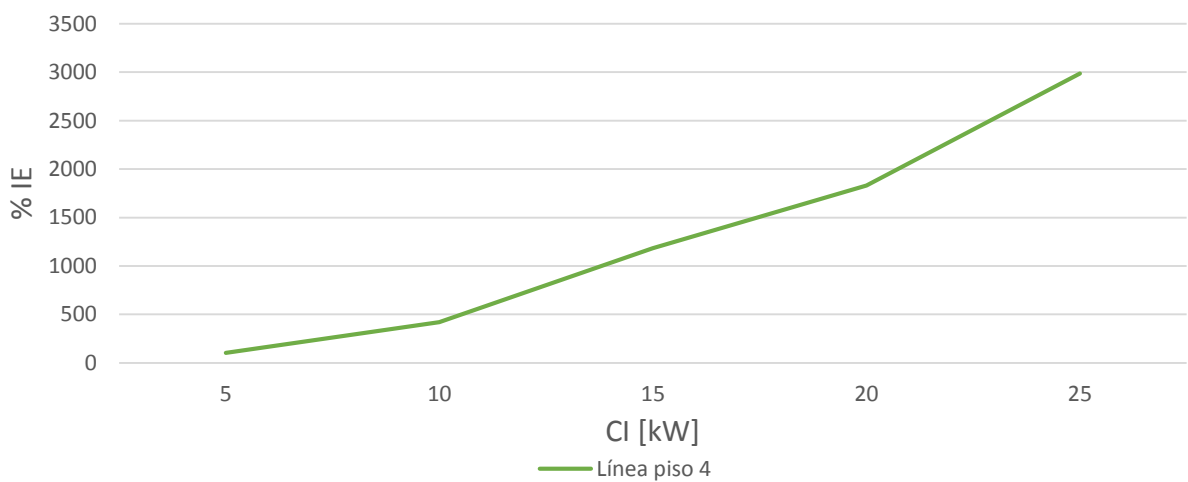


Figura 60. Pérdidas de energía activa para la línea BGBT-TDP4.

La Figura 61 evidencia el caso de la línea que une la mayor parte de la red de BT del Edificio a la red de distribución (línea trafo-BGBT), esta curva presenta una disminución de pérdidas de energía para los dos primeros escenarios de capacidad instalada, ya que el flujo de potencia es

mejor al estar presente la generación FV. Cuando se aumenta la capacidad instalada de energía FV a partir de 15 kW el flujo de potencia cambia de sentido ya que los SFV suplen toda la demanda del BGBT y aumenta la corriente presente en la línea, lo que ocasiona el aumento de pérdidas.

La Figura 62 muestra que a medida que se aumente la capacidad instalada de generación FV las líneas en la red de BT tienden a seguir su línea de tendencia, ya sea en aumento o disminución de las pérdidas de energía.

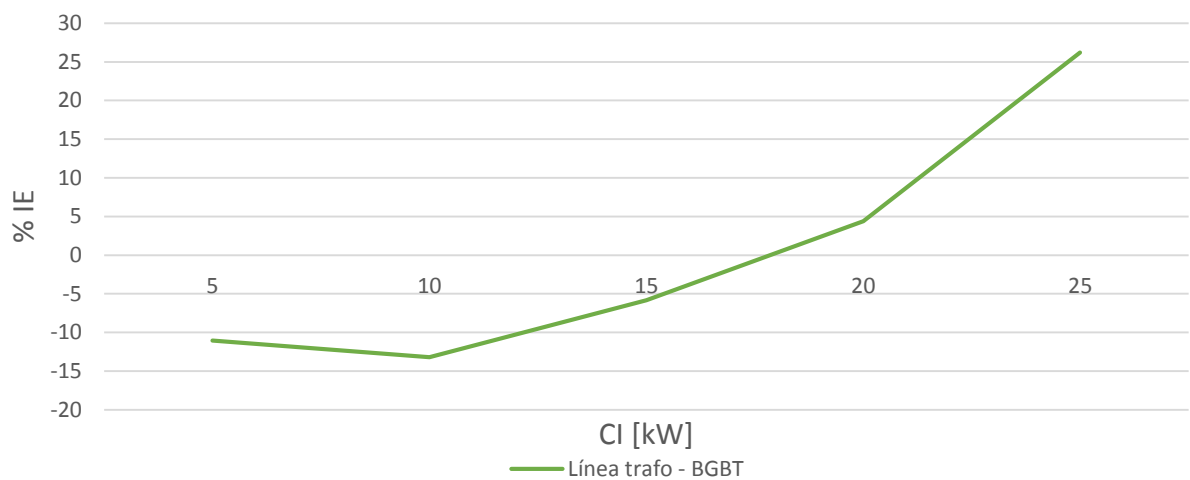


Figura 61. Pérdidas de energía activa para la línea lado de baja del trafo-BGBT.

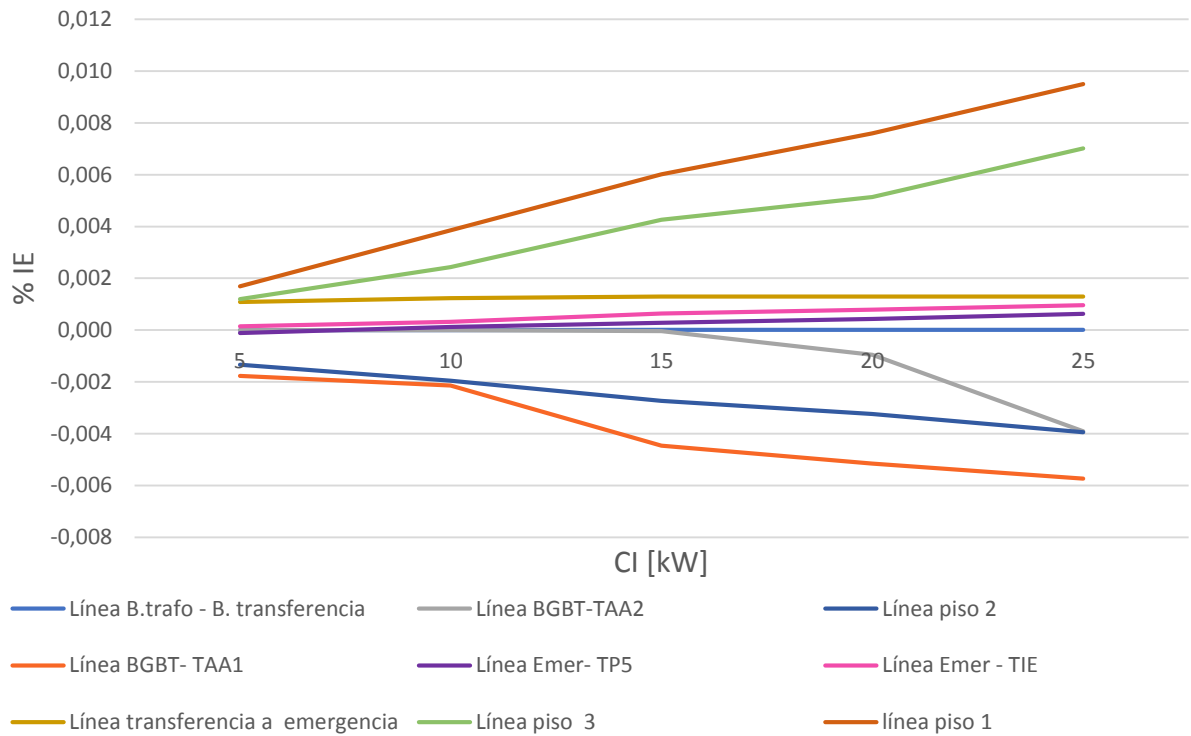


Figura 62. Pérdidas de energía activa para las líneas de la red de BT de Edificio.

Finalmente, la Tabla 11, presenta los resultados de un análisis de pérdidas en todos los conductores de la red, realizado para todo el año 2018. Los resultados de dicho análisis evidencian un significativo aumento en las pérdidas de potencia activa, llegando a alcanzar aproximadamente un 51% más de pérdidas en toda la red de BT del edificio en comparación cuando no se inyecta generación FV.

Tabla 11.
Valores de pérdidas totales de la red y porcentaje de variación para el 2018.

| Capacidad instalada [kW] | Sin FV | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Pérdidas totales de la red de BT [kW] | 1121,38 | 1144,12 | 1207,89 | 1350,39 | 1477,50 | 1692,87 |

| Capacidad instalada | Sin | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|----------------------------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| [kW] | FV | | | | | |
| Indicador de | 0 | 2,02 | 7,71 | 20,42 | 31,75 | 50,96 |
| evaluación [% IE] | | | | | | |

6. Conclusiones

- Con base en los modelos encontrados en la literatura para representar las cargas eléctricas, se eligió el modelo ZIP debido que éste es el más adecuado para modelar las cargas existentes en el Edificio de Ingeniería Eléctrica.
- PowerFactory es un programa de investigación que facilita el estudio en las redes de BT con integración de sistemas fotovoltaicos dado que cuenta con una herramienta dedicada al cálculo de flujo de carga que varía en el tiempo, llamada *simulación cuasi-dinámica*. Esta herramienta permite realizar un análisis comparativo entre distintos escenarios en un periodo de tiempo determinado por el usuario.
- El perfil de tensión incrementa al conectar un generador FV en la red de BT. Este impacto tiende a decrecer a medida que se aleja del punto de conexión de la generación FV. Como caso de estudio para una máxima capacidad instalada de 25 kW pico no se exceden los límites de tensión establecidos para Colombia en BT según la Norma Técnica Colombiana NTC 1340 y la resolución CREG 095, para que suceda una sobretensión en el Edificio, se debe considerar una capacidad instalada de generación FV de aproximadamente de 143 kW.
- Para las líneas que conforman la red de BT del Edificio no es posible determinar cuáles líneas de la red podrían presentar un aumento o disminución de pérdidas de energía, dado que entre éstas no se encuentra una causa en común.

- Las pérdidas de energía en todos los conductores del Edificio durante el 2018 tienden a aumentar a medida que la capacidad instalada incrementa. Para el caso real de 10 kW de capacidad instalada se tiene un aumento en las pérdidas de energía del 7,71% al inyectar generación FV y se puede llegar a aumentar las pérdidas hasta un 51% cuando se tiene una máxima capacidad instalada de 25kW.

Referencias bibliográficas

- Aguirre, R., & Xean, D. (2016). Improved Power Flow Program for Unbalanced Radial Distribution Systems Including Voltage Dependent Loads. *IEEE*, 4(1).
- Anaya, Gabriel ; Avellaneda, C., & Cárdenas, J. (2013). *Influencia de parámetros de diseño de aplicaciones sostenibles sobre el consumo energético en las instalaciones del quinto piso del edificio de ingeniería eléctrica a partir de simulaciones con designbuilder*. Universidad Industrial de Santander.
- Arévalo, D., Mantilla, E., & Sáchica, A. (2013). *Monitoreo, soporte operativo y documental del sistema de automatización del nuevo edificio de la E3T*. Universidad Industrial de Santander.
- Arif, A., Member, S., Wang, Z., Wang, J., Member, S., Mather, B., ... Member, S. (2017). Load Modeling – A Review. *IEEE*, 3053(c), 1–15. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2700436>
- Ariza, M. A. W. (2016). *Metología para estimar perfiles de demanda agregada a partir de modelos de patrones de tiempo de uso para cargas residenciales individuales tipo electrodoméstico*. Universidad Industrial de Santander.
- Bautista, M. (n.d.). UIS. Retrieved from <https://review.wizehive.com/voting/view/ieee2017photo/49459/4874019%0D>
- Bokhari, A., Member, S., Alkan, A., Dogan, R., Diaz-aguiló, M., León, F. De, ... Uosef, R. E. (2014). Experimental Determination of the ZIP Coefficients for Modern Residential, Commercial, and Industrial Loads. *IEEE*, 29(3), 1372–1381.
- Buitrago Arroyave, L. F., & López Lezama, J. M. (2013). Valoración de los impactos técnicos de la generación distribuida en sistemas de energía eléctrica. *Tecnura*, 17(36), 50–60.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.2.a04>

Caetano, W., Jota, P., & Gonçalves, E. (2013). Comparison between Static Models of Commercial/Residential Loads and Their Effects on Conservation Voltage Reduction. *IEEE*, 1, 6.

Chimborazo, L. (2010). *Análisis de estabilidad de voltaje del sistema nacional interconectado - SNI para el periodo 2010-2013, usando el programa DigSilent Power Factory*. Escuela Politécnica Nacional.

Collin, A. (2013). *Advanced Load Modelling for Power System Studies*. The University of Edinburgh.

Collin, A., Tsagarakis, G., Member, S., & Kiprakis, A. (2014). Development of Low-Voltage Load Models for the Residential Load Sector. *IEEE*, 29(5), 2180–2188.

CREG. Resolución CREG 030 de 2018, Mme § (2015). Retrieved from [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/83b41035c2c4474f05258243005a1191/\\$FILE/Creg030-2018.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/83b41035c2c4474f05258243005a1191/$FILE/Creg030-2018.pdf)

Del, A., & Ingenierías, E. D. E. (2012). *Suministro, montaje y puesta en funcionamiento del sistema de automatización del edificio de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones*.

Fallis, A. . (2013). Ley 1715 De 2014. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Figuroa, F. R. G. (2015). *Diseño de un programa de mantenimiento para lo sistemas de automatización, seguridad y componentes sostenibles del edificio E3T de la UIS*. PhD Proposal. Universidad Industrial de Santander.

<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Gacía Arbelaez, C., Vallejo, G., Higgins, M. Lou, & Escobar, E. M. (2016). *El Acuerdo De París Así Actuará Colombia Frente Al Cambio Climático*.

Gaitán, Luis; Gómez, Juan; Rivas, E. (2018). Análisis cuasi-dinámico de la inclusión de generación distribuida en sistemas eléctricos de potencia , caso de estudio : Sistema IEEE de 30 nodos. *Revista UIS Ingenierías*, 17(2), 41–54.
<https://doi.org/https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018004>

González, Maritza; Ortiz, D. (2016). *Simulación de la microrred de la facultad de ingeniería de la Universidad Distrital FJDC*. Universidad Distrital Fransisco José de Caldas.

Gutiérrez, D. (2009). *Efectividad de baja tensión en distribución como medida de disminución de demanda de la energía eléctrica*. Universidad de Chile.

Hatipoglu, Kenan; Fidan, Ismail; Radman, G. (2012). Investigating Effect of Voltage Changes on Static ZIP Load Model in a Microgrid Environment. *IEEE*.

Hatipoglu, K., & Fidan, I. (2014). MATLAB based GUI to Investigate Effect of Voltage Changes on Static ZIP Load Model in a Microgrid. *IEEE*, (1), 2–6.

Hernández, J. A. (2012). *Metodología para el análisis técnico de la masificación de sistemas fotovoltaicos coo opción de generación distribuida en redes de baja tensión*. Universidad Nacional de Colombia.

Osma Pinto, A., & Ordoñez, G. (2013). *Piloto de edificación verde como laboratorio vivo en la Universidad Industrial de Santander*.

Otero, Jorge; Pedrozo, J. (2015). *Caracterización de instalaciones eléctricas y cargas del edificio de ingeniería eléctrica de la Universidad Industrial de Santander*. Universidad Industrial de

Santander.

Palm, S., & Schegner, P. (2016). Static and Transient Load Models Taking Account Voltage and Frequency Dependence. *IEEEi*, (1), 1–7.

Quezada, M. L. (2013). *Modelos de cargas y sus efectos en estudios sistémicos: Aplicaciones al SING*. Universidad de Chile.

Rios, P., Agbossou, K., & Cardenas, A. (2017). Taylor Series Approximation of ZIP Model for On-line Estimation of Residential Loads' Parameters. *IEEE*.

Rodríguez, L., Pérez, S., & Mora, J. (2013). Estimación de Parámetros de un Modelo de Carga de Recuperación Exponencial Empleando Técnicas Metaheurísticas. *Scientia et Technica Año XVIII*, 18(3), 453–462. Retrieved from <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/8379>