



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN CIRCUITO DE
DISTRIBUCIÓN INDUSTRIAL PARA JASEC EN
CARTAGO DENTRO DE UN ENTORNO
GEORREFERENCIADO, EN CUMPLIMIENTO DE LA
LEY 10086**

*Trabajo final de graduación para optar por el Título de Ingeniero en
Mantenimiento Industrial, grado Licenciatura*

REALIZADO POR:
Raúl Ignacio Castillo Rivera

Cartago, noviembre de 2024



Carrera evaluada y acreditada por: Agencia de Acreditación de
programas de Ingeniería y de Arquitectura

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons
"Atribución-No comercial Compartir igual 4.0 Internacional".



OPER-218-2024

Cartago, 11 de Noviembre del 2024

ASUNTO: Aceptación de TFG

**Señor
Ing. Sebastián Mata Ortega
Coordinador de TFG
Mantenimiento Industrial del ITCR**

Estimado señor:

Como es de su conocimiento, el estudiante Raúl Ignacio Castillo Rivera, cédula 305250834, realizó durante el segundo semestre del año 2024 la TFG en JASEC asociado al Modelado y simulación de un circuito de distribución industrial para JASEC en Cartago dentro de un entorno georreferenciado, en cumplimiento de la Ley 10086, para optar por el grado de Licenciatura en Mantenimiento Industrial del ITCR.

El trabajo fue finalizado y presentado a nuestra empresa en los últimos días, por lo que posterior a revisar el trabajo realizado por esta persona, JASEC en representación de mi persona, como Director de Operaciones de la empresa, da aceptación formal y a satisfacción del trabajo realizado por esta persona y da también por finalizado el periodo de práctica realizado en nuestra empresa.

Agradecemos la ayuda brindada en este proceso y facilitar personal de calidad profesional y personal, como lo es del caso de estudiante Castillo Rivera.

Sin más por el momento, se suscribe.

**CRISTIAN
ACUÑA BRENES
(FIRMA)**

Firmado digitalmente
por CRISTIAN ACUÑA
BRENES (FIRMA)
Fecha: 2024.11.11
12:24:00 -06'00'

**Ing. Cristian Acuña Brenes
Director, Dirección de Operaciones JASEC**

Cc: Consecutivo

CARTA DE APROBACIÓN, POR PARTE DE LA FILÓLOGA, DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Heredia, 4 de noviembre del 2024

Señores

Escuela de Ingeniería Electromecánica
Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC)

Estimados señores:

Leí y corregí el Trabajo Final de Graduación, denominado: **“Modelado y simulación de un circuito de distribución industrial para JASEC en Cartago dentro de un entorno georreferenciado, en cumplimiento de la Ley 10086”**, elaborado por el estudiante **Raúl Ignacio Castillo Rivera**, cédula 3-0525-0834, para optar por el grado académico de **Licenciatura en Ingeniería en Mantenimiento Industrial**.

Corregí el trabajo en aspectos tales como: construcción de párrafos, vicios del lenguaje que se trasladan a lo escrito, ortografía, puntuación y otros relacionados con el campo filológico, y desde ese punto de vista considero que está listo para ser presentado como Trabajo Final de Graduación, por cuanto cumple con los requisitos establecidos por la Universidad.

Se suscribe de ustedes cordialmente,

ZAYDA

UREÑA ARAYA

(FIRMA)

Firmado digitalmente
por ZAYDA UREÑA

ARAYA (FIRMA)

Fecha: 2024.11.04

17:51:26 -06'00'

Zayda Ureña Araya

Número de carné profesional: 0163840

Teléfono 8726130

Correo electrónico: zaylaud1717@gmail.com

Hoja de Datos

Datos personales

Nombre completo: Raúl Ignacio Castillo Rivera

Número de cédula: 3-0525-0834

Número de carné: 2019066065

Número de teléfono: +506 8682-8774

Correo electrónico: raul.cast140@gmail.com

Dirección exacta de domicilio: Cartago, Alvarado, Pacayas, 125 metros noreste de la plaza de deportes Pacayas.

Información del proyecto

Título: Modelado y simulación de un circuito de distribución industrial para JASEC en Cartago dentro de un entorno georreferenciado, en cumplimiento de la Ley 10086.

Asesor Industrial: Ing. Marco Centeno Masís.

Profesor Guía: Mgtr. Gonzalo Mora Jiménez.

Jurado Evaluador:

- Msc. Lisandro Araya Rodríguez.
- Mgtr. Luis Carlos Muñoz Chacón.

Datos de la Empresa

Nombre: Junta Administrativa del Servicio Eléctrico Municipal de Cartago (JASEC).

Actividad Principal: Distribución de energía eléctrica y otros servicios relacionados en la provincia de Cartago.

Dirección: 100m sur y 25m oeste de la Municipalidad de Cartago, Cartago centro.

Contacto: Ing. Christian Acuña Brenes.

Teléfono: +506 25506800, ext.7142.

Resumen

Este trabajo final de graduación se enfoca principalmente en estudiar la capacidad de integración de recursos energéticos distribuidos (DER) en el circuito Parque Industrial de la empresa JASEC, siguiendo lo establecido por la Ley N° 10086 en Costa Rica; este tipo de estudios se desarrollan por las implicaciones que puede presentar la integración de DER a una red de distribución, por ejemplo; sobretensiones, desbalance de tensiones, aumento de corrientes de falla, disparos indebidos, entre otros.

El trabajo se desarrolla por medio de diferentes etapas, iniciando con la recolección de información del departamento del GIS (Sistema de Información Georreferenciada), de donde se extraen las características de cada uno de los elementos que componen el circuito Parque Industrial, utilizando herramientas como Python y hojas de cálculo. Con los archivos de datos se realiza el modelado de la red en etap®; cuando se tiene la base del modelo configurado con los diferentes escenarios de penetración de DER, se realizan estudios de flujos de potencia y cortocircuito según diferentes casos de integración en gran escala y pequeña escala.

Después de correr los escenarios cargados en el circuito se analizan los criterios de capacidad de integración de DER establecidos por ARESEP, de donde se obtiene una capacidad, en gran escala, asociada a cada región de la línea de distribución que alimenta la red de Parque Industrial iniciando con 34 MW de capacidad en las regiones más cercanas a la subestación y terminando con 26 MW de posible alojamiento de DER en las partes más lejanas de la línea. Para el caso de pequeña escala se asigna una capacidad de penetración según la capacidad nominal de cada transformador alojado en la red. Los resultados obtenidos de resumen están en una página web donde se presenta de manera interactiva la capacidad del circuito georreferenciado.

Para el estudio económico, se analiza el impacto de los diferentes escenarios de integración de DER en el circuito Parque Industrial, donde se obtiene que después de un caso de penetración del 20% la empresa distribuidora presentaría pérdidas al generarse un margen de operación negativo, lo que significa una baja importante en la cantidad de ingresos percibidos por la empresa, esto siguiendo consideraciones muy específicas de comportamiento del circuito.

Después de desarrollar el proyecto se presentaron algunas recomendaciones a la empresa distribuidora, por ejemplo, idear una metodología para la automatización del proceso de traslado de información del GIS al software de simulación, en escenarios de pequeña y gran escala. También, se sugirió presentar los resultados de capacidad de integración, para cada circuito, utilizando un mapa interactivo alojado en una página web, facilitando la comprensión de resultados. Además, un punto importante por considerar es realizar una revisión de la información alojada en los archivos de cada circuito, para asegurar que el proceso de modelado sea preciso y ágil.

Palabras clave: Recursos energéticos distribuidos, sistemas de distribución, capacidad de penetración, panel fotovoltaico, flujos de potencial, escenarios de integración.

Abstract

This final graduation project mainly focuses on studying the integration capacity of distributed energy resources (DER) in the Parque Industrial circuit of the JASEC company, following the provisions established by Law No. 10086 in Costa Rica. Such studies are developed due to the implications that DER integration can present to a distribution network, such as overvoltages, imbalances, increased fault currents, and improper tripping, among others.

The work is developed through different stages, starting with the collection of information from the GIS department, from which the characteristics of each of the elements that make up the Parque Industrial circuit are extracted using tools like Python and spreadsheets. With the data files, the network is modeled in etap®; once the base model is configured with the different DER penetration scenarios, power flow and short-circuit studies are carried out according to various large-scale and small-scale integration cases.

After running the scenarios in the circuit, the integration capacity criteria for DER established by ARESEP are analyzed, resulting in a large-scale capacity associated with each region of the distribution line that feeds the Parque Industrial network, starting with 34 MW of capacity in the regions closest to the substation and ending with 26 MW of potential DER accommodation in the furthest parts of the line. For the small-scale case, a penetration capacity is assigned based on the nominal capacity of each transformer housed in the network. The obtained results are summarized on a website where the capacity of the georeferenced circuit is presented interactively.

For the economic study, the impact of different DER integration scenarios in the Parque Industrial circuit is analyzed, concluding that after a 20% penetration case, the distribution company would incur losses due to a negative operating margin, which indicates a significant decrease in the revenue received by the company, following very specific considerations regarding the circuit's behavior.

After developing the project, several recommendations were presented to the distribution company. For example, to devise a methodology for automating the process of transferring information from GIS to the simulation software, in both small-scale and large-scale scenarios. It was also suggested to present the integration capacity results for each circuit using an interactive map hosted on a website, facilitating the understanding of results. Additionally, an important point to consider is to review the information stored in the files of each circuit to ensure that the modeling process is accurate and efficient.

Keywords: Distributed energy resources, distribution systems, penetration capacity, photovoltaic panel, power flows, integration scenarios.

Agradecimientos

A mis padres: Marcela y Raúl, quienes siempre me apoyaron desde que inicié mi etapa de estudios universitarios.

A los profesores Gonzalo Mora y Gustavo Gómez por su apoyo, conocimiento y guía brindados durante todo el proceso de desarrollo de este proyecto.

A JASEC por darme la oportunidad de desarrollar mi proyecto final de graduación y a todas las personas que conocí en la empresa, especialmente a los ingenieros Marco Centeno, Marco Romero y Christian Acuña que siempre estuvieron dispuestos a ayudar y orientar para finalizar exitosamente el trabajo.

A los compañeros Jose Macías y Yosuar Sánchez, a quienes conocí gracias a este trabajo de graduación, y que me apoyaron durante el desarrollo de este proyecto.

A todos mis compañeros de carrera, amigos y profesores que me acompañaron en mi proceso de formación, gracias por siempre estar dispuestos a ayudarme en todo momento, en especial a: Daniel Torres, Pablo Rodríguez, Eduardo Gómez, Henry Alvarez, Esteban Quesada y Jose Romero.

Dedicatoria

A mis padres, familiares y amigos que siempre creyeron en mi, esta meta se cumplió gracias a su apoyo incondicional.

Índice general

1	Capítulo 1. Introducción	1
1.1	Reseña de la empresa	2
1.1.1	Misión	2
1.1.2	Visión	2
1.2	Antecedentes	2
1.3	Planteamiento del problema	4
1.4	Objetivo general	4
1.5	Objetivos específicos	5
1.6	Justificación	5
1.7	Alcance	6
1.8	Viabilidad	6
1.9	Administración del riesgo	7
1.10	Metodología	7
2	Capítulo 2. Marco teórico	11
2.1	Generación distribuida	11
2.1.1	Tecnologías de Generación Distribuida	11
2.1.2	GD con paneles solares	12
2.1.3	Potencial eléctrico fotovoltaico	13
2.1.4	Tipos de GD	13
2.2	Ley 10086	13
2.2.1	Tarifas de generación distribuida	14
3	Capítulo 3. Modelo del circuito	15
3.1	Descripción del circuito	15
3.1.1	Sistema de Información Georreferenciada (GIS)	15
3.2	Máxima demanda	16
3.3	Elementos del circuito en etap [®]	16
3.3.1	Subestación	16
3.3.2	Líneas de distribución	17
3.3.3	Elementos de protección	19
3.3.4	Transformadores	19
3.3.5	DER instalados	21
3.3.6	Adaptadores de fase	21
3.3.7	Cargas de circuito	23
3.3.8	Modelo terminado	25
3.4	Evaluación final del circuito	25
4	Capítulo 4. Estudio de capacidad de penetración de DER	26
4.1	Escenario de integración de GD a gran escala	26
4.1.1	Configuración del modelo	26

4.1.2	Escenarios	28
4.1.3	Resultados	29
4.2	Escenario de integración de GD en pequeña escala	30
4.2.1	Configuración del modelo	30
4.2.2	Escenarios	30
4.2.3	Resultados	31
4.3	Criterios de evaluación	31
4.4	Evaluación escenario de gran escala	33
4.5	Evaluación de escenarios de pequeña escala	36
4.6	Resumen con capacidades de integración de DER.	37
4.7	Mapa con resultados de capacidad de penetración	38
4.8	Tabla resumen de estudios	41
5	Capítulo 5. Estudio Económico.	43
5.1	Estratégica operativa de JASEC	43
5.2	Costos mensuales	43
5.3	Ingresos mensuales	44
5.4	Tarifas de generación distribuida	45
5.4.1	Tarifa de interconexión	45
5.4.2	Tarifa T-DER	45
5.4.3	Tarifa de acceso	45
5.4.4	Tarifa por compra y venta de excedentes	45
5.5	Efectos de integración de DER	45
5.5.1	Efecto en costos	46
5.5.2	Efecto por tarifas de generación distribuida	46
5.6	Comportamiento del margen de operación	47
6	Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones	48
6.1	Conclusiones	48
6.2	Recomendaciones	49
	Bibliografía	51
A	Apéndice A. Información para un panel solar.	52

Índice de tablas

1.1	Metodología para el desarrollo del Trabajo Final de Graduación	9
4.1	Nodos seleccionados para el estudio de gran escala y red compuesta asociada	27
4.2	Criterios de análisis para estudio de capacidad de penetración en Circuito Parque Industrial	32
4.3	Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI9	33
4.4	Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI20	33
4.5	Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI87	34
4.6	Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI18	34
4.7	Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI57	34
4.8	Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI77	35
4.9	Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI66	35
4.10	Criterios de estudio para escenarios en nodo NB0	35
4.11	Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI169	36
4.12	Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI183	36
4.13	Capacidad de Alojar DER por Nodo CPI	37
4.14	Capacidad de Alojar DER por Nodo CPI	37
4.15	Capacidad de Alojar DER por transformador CPI	38
4.16	Reporte Circuito Parque Industrial	42
5.1	Tarifas para compra de energía y potencia	44
5.2	Costo mensual de compra de energía al ICE	44
5.3	Costo mensual de compra de potencia al ICE	44
5.4	Margen de operación de JASEC sin DER integrado	44
5.5	Tarifas para cobro de recursos energéticos distribuidos	45
5.6	Reducción en costo mensual por concepto de compra de energía por panel	46
5.7	Impacto por panel para un cliente promedio del circuito Parque Industrial	47
5.8	Efectos de integración de DER en el circuito Parque Industrial	47
A.1	Energía y potencia de un panel solar en un día para Cartago, Costa Rica	53

Índice de figuras

2.1	Funcionamiento de un panel solar. Fuente: Autoría propia	12
2.2	Potencial Eléctrico Fotovoltaico en Costa Rica. Fuente: [1]	13
3.1	Curva de demanda del circuito 270 (Parque industrial) de JASEC. Fuente: Autoría propia	16
3.2	Representación gráfica del elemento barra infinita en el software etap®. Fuente: etap® .	17
3.3	Configuración de barra oscilante para la subestación Tejar. Fuente: etap®	17
3.4	Parámetros de líneas de distribución aéreas. Fuente: etap®	18
3.5	Configuración de líneas de distribución aéreas. Fuente: etap®	18
3.6	Configuración de líneas de distribución subterráneas. Fuente: etap®	19
3.7	Configuración de transformadores. Fuente: etap®	20
3.8	Impedancia de transformadores. Fuente: etap®	20
3.9	Perfiles de potencia de sistemas de generación distribuida instalados en circuito Parque Industrial. Fuente: Autoría propia	21
3.10	Características de la máquina de inducción. Fuente: etap®	22
3.11	Parámetros de la máquina de inducción. Fuente: etap®	22
3.12	Configuración del adaptador de fase. Fuente: etap®	23
3.13	Configuración del cable para ramales y acometidas. Fuente: etap®	23
3.14	Configuración de elemento para cargas monofásicas. Fuente: etap®	24
3.15	Configuración de elemento para cargas monofásicas. Fuente: etap®	24
3.16	Circuito Parque Industrial modelado en etap®. Fuente: etap®	25
4.1	Arreglo de transformadores para estudios de gran escala en etap®. Fuente: etap®	27
4.2	Arreglo de generadores para estudios de gran escala en etap®. Fuente: etap®	28
4.3	Casos de nodos de estudio y activación de interruptores en gran escala. Fuente: etap® . .	28
4.4	Ventana de configuración de Scenario Wizard en etap (Caso gran escala). Fuente: etap®	29
4.5	Ventana de Load Flow Analyzer en etap. Fuente: etap®	30
4.6	Integración de GD en estudio de pequeña escala. Fuente: etap®	31
4.7	Caso de estudio y activación de interruptores en pequeña escala. Fuente: etap®	31
4.8	Hoja de datos de capacidad para estudio de gran escala. Fuente: Autoría propia	39
4.9	Hoja de datos de capacidad para estudio de pequeña escala. Fuente: Autoría propia	39
4.10	Mapa de capacidad de alojamiento de DER para circuito Parque Industrial. Fuente: Autoría propia	40
4.11	Escala de capacidad de alojamiento de DER para circuito Parque Industrial. Fuente: Autoría propia	40
4.12	Información de capacidad de alojamiento de DER para pequeña escala. Fuente: Autoría propia	41
4.13	Información de capacidad de alojamiento de DER para gran escala. Fuente: Autoría propia	41

Nomenclatura

ARESEP	Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos
BT	Baja Tensión
DER	Recursos Energéticos Distribuidos
GD	Generación distribuida
GIS	Sistema de Información Georreferenciada
GSA	Global Solar Atlas
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
IEA	International Energy Agency
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITCR	Instituto Tecnológico de Costa Rica
JASEC	Junta Administrativa del Servicio Eléctrico de Cartago
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
MT	Media Tensión
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PND	Plan Nacional de Descarbonización
PNE	Plan Nacional de Energía
PU	Por Unidad
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SEN	Sistema Eléctrico Nacional

Capítulo 1

Introducción

En Costa Rica se ha presentado, en los últimos años, un crecimiento importante en el uso de energías renovables, especialmente la energía solar distribuida y su integración al Sistema Eléctrico Nacional. Este crecimiento de la utilización de energías renovables hace necesario entender cómo ellas pueden llegar a afectar la infraestructura eléctrica local en el contexto de diferentes distribuidoras del territorio nacional, como lo es en este caso la Junta Administrativa del Servicio Eléctrico Municipal de Cartago (JASEC), y de esta forma poder establecer las pautas de integración segura de energía renovable a los circuitos actuales y futuros.

Actualmente se encuentra vigente la Ley 10086, la cual establece las condiciones óptimas para la regulación y promoción de los recursos energéticos distribuidos generados a partir de energías renovables. En esta ley se establecen, en el artículo 7, las obligaciones de la empresas distribuidoras, las cuales deben mantener de forma actualizada la información de capacidad de penetración de energías renovables por circuito [1]; por lo tanto, es importante aplicar tecnologías informáticas, como lo es análisis de datos en Python y Sistemas de Información Georreferenciada (GIS), para asegurar el tratamiento adecuado de la información de los circuitos eléctricos de la distribuidora JASEC, además de ser necesarios para realizar modelado y simulaciones de penetración de generación distribuida a los circuitos actuales y futuros.

El proceso por llevar a cabo para desarrollar el trabajo se basa en construir un catálogo de información de conductores y transformadores basado en información georreferenciada, estimar un perfilado de demanda de la carga utilizando información de medidores con estimaciones a largo plazo, generar una base de datos según circuito, con la información de los elementos que lo componen, para la migración de información al software de simulación, y realizar un estudio de beneficio económico para la cuantificación del impacto en futuras inversiones de la empresa distribuidora.

Para poder establecer las características de los circuitos de distribución, de la empresa distribuidora JASEC, es indispensable establecer la características técnicas y criterios de diseño de los elementos que componen cada circuito en especial. Toda esta información debe estar debidamente georreferenciada, para agilizar el tratamiento de los datos y realizar un análisis lo más apegado a la realidad actual del sistema.

Con la información recolectada, es necesario llevar a cabo una base de datos que aloje las características de cada circuito, de forma que se pueda extraer fácilmente la ubicación y las propiedades de los elementos alojados en la red.

El proceso de modelado y simulación es indispensable para poder desarrollar un estudio del comportamiento de los circuitos eléctricos durante su funcionamiento a través del tiempo, esto permite generar reportes de cómo puede llegar a impactar la integración de generación distribuida a ciertos circuitos de la empresa distribuidora, de forma que se puedan establecer medidas de adaptación para cumplir con lo establecido en la Ley 10086, asegurando en todo momento la seguridad y continuidad en el servicio eléctrico suministrado a los abonados.

Para finalizar el trabajo es necesario realizar un estudio de los beneficios económicos para determinar el impacto de inversiones futuras en los circuitos con los que cuenta la empresa distribuidora, los cuales

se pueden ver influenciados por la generación distribuida.

1.1. Reseña de la empresa

En el mes de noviembre de 1961 se originó en Cartago el precedente que inició la "huelga de pagos eléctricos", dado que en ese entonces se produjo un aumento de las tarifas eléctricas y la aplicación de un "factor térmico", además de una demanda, de parte de los ciudadanos, de mejores instalaciones eléctricas en algunas zonas de Cartago. La huelga de pagos eléctricos produjo una movilización social importante de los cartagineses, quienes lucharon por asegurarse el servicio eléctrico de calidad; esto desencadenó un enfrentamiento en el Alto de Ochomogo entre la fuerza pública y los huelguistas, dejando como saldo tres fallecidos, varios heridos y muchas personas detenidas [2].

Después de dos años y medio de huelga, donde se daban manifestaciones cada ocho o quince días en horas no establecidas, se agilizó en la Asamblea Legislativa el Proyecto de Ley para la creación de la Junta Eléctrica en Cartago.

En busca de administrar la empresa eléctrica de Cartago, se creó la Junta Administrativa del Servicio Eléctrico Municipal de Cartago (JASEC), por medio de la Ley N°. 3300, con publicación en La Gaceta No.166, esto en el año 1964 [2].

JASEC es el ente encargado de administrar el servicio eléctrico y de infocomunicaciones de calidad en la provincia de Cartago. Actualmente tiene influencia en zonas como Cartago Central, Alvarado, El Guarco, Oreamuno, y Paraíso. JASEC brinda el servicio realizando la compra de energía al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), además de generar un porcentaje de la energía demandada.

1.1.1. Misión

Contribuir al progreso de la zona servida, mediante la prestación eficiente de servicios públicos de calidad con los más altos principios éticos que impulsen el desarrollo sostenible y la responsabilidad social.

1.1.2. Visión

Ser una persona que garantice a sus clientes calidad y continuidad en los servicios que presta, por medio de su sostenibilidad financiera y operativa como un agente innovador y competitivo en el mercado eléctrico y de Infocomunicaciones.

1.2. Antecedentes

Se ha observado, en los últimos años, cómo el consumo energético alrededor del planeta aumenta y demanda mayores cantidades de este recurso para alimentar diferentes sectores productivos, desde el transporte hasta la industria. Esta mayor demanda energética muchas veces se debe a un crecimiento y diversificación de líneas productivas, las cuales permiten que las empresas se vuelvan en actores importantes en el ámbito económico de las sociedades. Este crecimiento permite que se generen empleos para para los ciudadanos, diversificación económica, visibilidad y progreso para los países, entre otros muchos beneficios. Aunque se pueden obtener muchos beneficios del crecimiento de la industria, este también conlleva un deber de las empresas con el medio ambiente, dado que el aumento de productividad puede llegar a generar desechos y emisión de gases de efecto invernadero; por este motivo, las empresas deben invertir

en nuevas y eficientes formas de administrar el consumo energético y el adecuado manejo de residuos.

Para el año 2015, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) estableció una serie de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), los cuales buscan poner fin a la pobreza y asegurar la paz para el año 2030. Para alcanzar este objetivo, se establecieron 17 objetivos clave, centrados en aspectos sociales, económicos, energéticos y medioambientales [3]. Al leer detenidamente cada uno de los ODS, se puede observar cómo seis de estos objetivos buscan el desarrollo sostenible, esperando satisfacer las necesidades humanas sin llegar a agotar los recursos disponibles en la naturaleza. En la lista de ODS también se tienen tres objetivos directamente relacionados con la producción y el crecimiento económico. Uno de los objetivos más llamativos de la lista de los 17 ODS es el de energía asequible y no contaminante (N.º7), donde se establecen metas específicas como aumentar la proporción de energías renovables, así como facilitar el acceso e inversión en infraestructura energética de calidad y asociada cada vez más a energías limpias.

Así como se han generado a nivel internacional estrategias de desarrollo sostenible, también se han establecido en Costa Rica estrategias encaminadas a la promoción del crecimiento económico basado en el consumo eficiente de energía y la producción de energías limpias; en este caso, para el año 2015 se publicó el Plan Nacional de Energía (PNE) 2015-2030 “Alberto Cañas Escalante”, el cual cuenta con siete secciones, que pretenden generar una visión a corto y largo plazo de la situación energética en el país, buscando un desarrollo económico bajo en emisiones de gases contaminantes y potenciando la generación, transmisión y distribución de energías amigables con el medio ambiente [4]. Además del PNE, también se han generado rutas de acción como el Plan Nacional de Descarbonización (PND), donde se busca que el Gobierno de la República permita un desarrollo de las comunidades mejorando la calidad de vida de los ciudadanos costarricenses, utilizando como eje central el medio ambiente. Relacionado con el sector industrial del país, el PND establece que se debe buscar un desarrollo de nuevas tecnologías de producción eficiente, y promover el uso de energía eléctrica, que puedan sustituir el uso de hidrocarburos en los sistemas productivos [5].

Actualmente, en Costa Rica se ha observado cómo diferentes empresas han planteado la incorporación de diferentes tecnologías de producción y consumo de energías renovables, las cuales permiten a las organizaciones la disminución de gastos relacionados con el consumo energético, por ejemplo, el uso de paneles solares en sistemas de producción agropecuaria, donde se ha logrado observar cómo la implementación de este tipo de tecnologías permite a las organizaciones disminuir su huella de carbono y reducir sus costos operacionales [6].

En Costa Rica existe una institución pública conocida como la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP), la cual se encarga de armonizar las necesidades de los usuarios con los intereses asociados a los prestadores, en el ámbito de la energía eléctrica. Este ente se encarga de velar por que el servicio eléctrico brindado por las diferentes distribuidoras del país sea adquirido por los abonados de una forma óptima; por este motivo la entidad pública tiene ciertos deberes para asegurar que las empresas prestadoras de servicios aseguren a los ciudadanos un servicio eléctrico de calidad. Según la Ley 10086 de promoción y regulación de recursos energéticos distribuidos a partir de fuentes renovables, ARESEP debe fiscalizar el cumplimiento de los instrumentos regulatorios que aseguren una integración segura y de calidad de la GD al SEN, además de establecer y formalizar los instrumentos regulatorios para que se lleven a cabo los estudios de capacidad de penetración de GD en los circuitos administrados por las empresas distribuidoras [1].

Además de los deberes asociados al ente regulador ARESEP, también se tienen obligaciones de parte de las empresas distribuidoras, las cuales se encuentran en el artículo 7 de la Ley N.º10086, donde se establece que las organizaciones deben desarrollar inversiones y estudios, que permitan la integración óptima de GD a la red, además de que es indispensable la actualización de la capacidad de penetración de GD a los circuitos de distribución que, a su vez se integran con las redes de distribución del SEN. Además, las empresas distribuidoras deben publicar las características específicas de los circuitos, la cantidad de GD alojada en estos y los límites de capacidad de penetración por circuito [1].

Según diferentes investigaciones que se han realizado a nivel mundial, se ha observado que la generación distribuida puede generar un impacto importante en la red eléctrica de distribución, dada la descentralización de la producción de energía; este impacto puede llegar a generar oportunidades de mejora a la red y también problemáticas para la confiabilidad del sistema. Algunas de las oportunidades que se pueden

mencionar, son que la GD puede resultar en una inversión beneficiosa para las diferentes organizaciones consumidoras de energía al reducir costos de producción, además de que la GD permite la reducción a la dependencia de grandes centrales generadoras y posible afectación por corte de fluido eléctrico [7]. Aunque se pueden presentar beneficios, también se considera que se pueden presentar afectaciones a la red, como lo puede ser la disminución de estabilidad y calidad de energía [8]; por este motivo, resulta importante que la GD sea integrada a la red de una forma ordenada y segura.

1.3. Planteamiento del problema

En Costa Rica, la Ley 10086 establece las pautas para la regulación y promoción de generación distribuida producida en el país a partir de fuentes de energía renovables. Así como se establecen, en el documento legal, las obligaciones del ente regulador del país (ARESEP), se establecen también obligaciones específicas para las empresas distribuidoras (artículo 7), buscando que los ciudadanos reciban un servicio eléctrico seguro y continuo.

Una de las obligaciones establecidas por ley, para las empresas distribuidoras es mantener actualizada la capacidad de penetración de generación distribuida en los circuitos administrados por la empresa, y que se integran al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) [1]. De esta forma, es indispensable que se conozca con detalle la información referente a cada uno de los elementos que conforman el sistema (cables y transformadores), además de que se necesitan localizar geográficamente los datos, asegurando la debida trazabilidad de los circuitos y los cambios que pueda sufrir a lo largo del tiempo.

Cuando se integran grandes cantidades de GD en un circuito eléctrico, se pueden presentar afectaciones como fluctuaciones en la tensión, sobretensiones, desbalanceo de la red, entre otros efectos negativos [8], aunque también se tienen estudios de casos en los que la GD puede suponer una manera de mejorar la red eléctrica disminuyendo la caída de tensión por largas distancias, mejoramiento de potencia, entre otros beneficios [9]; sea el caso en el cual se presente una afectación o un mejoramiento de la red, sus efectos serán directamente influenciados por la cantidad, ubicación y planificación de GD asociada a los circuitos.

Según otros trabajos similares, realizados anteriormente en JASEC por estudiantes del Instituto Tecnológico de Costa Rica, se presenta una problemática en el manejo de los datos de los circuitos administrados por la empresa distribuidora [10], ya que no se tiene completamente actualizada la información asociada a los elementos del sistema, de forma que en diferentes casos se han hecho simulaciones de sistemas de potencia en Cartago con información incompleta o inexistente, aplicando suposiciones y estableciendo estimados, los cuales no aseguran en su totalidad un reflejo del circuito real [11].

Dado que es obligación de las empresas distribuidoras asegurar la confiabilidad del servicio eléctrico que administran, es importante que se realicen actualizaciones de la información de la red debidamente georreferenciada para poder establecer modelos, los cuales luego son simulados, de forma que en todo momento se conozca con certeza los efectos positivos y negativos que puede llegar a tener la GD en los diferentes circuitos de la red, permitiendo que los abonados no se limiten en sus alternativas de consumo energético en beneficio del crecimiento económico del sector industrial y residencial, siguiendo además pautas ambientales de competitividad y sostenibilidad ambiental [3].

1.4. Objetivo general

Analizar el comportamiento de un circuito de distribución industrial de baja y media tensión de la provincia de Cartago en Costa Rica, para la Junta Administrativa del Servicio Eléctrico Municipal de Cartago a pequeña y gran escala, utilizando herramientas de programación y simulación por medio de software como Python y etap® dentro de un entorno georreferenciado para el cumplimiento de la Ley 10086.

1.5. Objetivos específicos

- Modelar un circuito de distribución de tipo industrial utilizando la información alojada en la base de datos del sistema de información georreferenciada (GIS) de la empresa distribuidora JASEC, para la actualización de la información de los elementos que componen el circuito Parque Industrial.
- Realizar un análisis de criterios de corriente para un circuito industrial a baja escala por medio de simulaciones, utilizando software para el establecimiento de límites seguros de integración de recursos distribuidos a la red.
- Desarrollar un estudio de capacidad de penetración de los recursos energéticos distribuidos mediante simulaciones de flujos de potencia y tensión en un circuito industrial a gran escala para una integración segura, eficiente y efectiva de los recursos energéticos distribuidos a la red eléctrica.
- Estimar el impacto económico de diferentes escenarios de integración de generación distribuida a la red a partir de un análisis financiero para la eficiente inversión futura en la red por parte de JASEC.

1.6. Justificación

En los últimos años, Costa Rica se ha caracterizado por el crecimiento en el uso de energías renovables; esto ha hecho que se implanten diferentes sistemas de generación, los cuales aprovechan recursos energéticos renovables, como lo es la energía solar, para poder alimentar con energía eléctrica diferentes industrias ubicadas en el territorio nacional; ello ha permitido que diferentes organizaciones obtengan beneficios importantes, como disminución en gastos asociados a facturación eléctrica y disminución de emisión de gases de efecto invernadero [6].

Dado el crecimiento de demanda energética en el país y el mundo, la generación distribuida (GD) se ha transformado en una alternativa llamativa para muchas empresas; por ejemplo, la colocación de paneles solares para consumir energía limpia en diferentes procesos productivos [12]. Este cambio en el consumo energético resulta en una adaptación de los sistemas de distribución, dado que los circuitos administrados por los prestadores de servicios eléctricos no solo se concentran en cargas que consumen energía, sino que también se tienen fuentes generadoras que inyectan energía a la red.

Para poder regular y promover el recurso energético distribuido a partir de fuentes renovables, se presenta vigente en Costa Rica la Ley 10086, donde se establecen las pautas necesarias para que desarrolle la transformación energética de forma óptima y controlada. En el documento legal se establecen acciones que deben ser efectuadas por las empresas distribuidoras, como lo son actualizar la capacidad de penetración de GD por circuito de distribución; por lo tanto, es importante que la empresa JASEC posea una metodología de seguimiento para que la información de los circuitos eléctricos se encuentre actualizada en todo momento [1], asegurando así la fiabilidad del sistema y permitiendo un ordenamiento adecuado de la integración de GD a la red, sin afectar al sistema ni a los abonados.

Para asegurar la fiabilidad y el óptimo funcionamiento de los circuitos de distribución, es indispensable conocer las características de los elementos integrados en la red y su ubicación exacta; de este modo es posible realizar modelos lo más parecidos a la realidad de una forma georreferenciada y, además, para facilitar el tratamiento de los datos es necesario alojar la información en sistemas de almacenamiento digital eficientes y de fácil manipulación, los cuales permitan migrar elementos desde bases de datos hacia softwares dedicados a simulación.

Además de considerar las capacidades técnicas de los circuitos de distribución, es importante conocer los efectos cualitativos y cuantitativos que puede suponer en los circuitos administrados por JASEC una futura inversión en la red; esto permite que se pueda estimar cuán beneficioso o perjudicial resulte implantar algún cambio específico siguiendo las regulaciones de la Ley 10086 y la futura integración de GD. Es importante considerar que la red eléctrica actual y futura debe estar preparada para los cambios tecnológicos que supone la integración de nuevas fuentes de energía renovable, asegurando así la confiabilidad

del servicio eléctrico, sin dejar de lado la integración segura de GD, para que la industria se ajuste a los cambios económicos, sociales y ambientales del país [5].

1.7. Alcance

El alcance de este proyecto es de tipo investigativo, ya que busca analizar un circuito industrial para evaluar el impacto de la integración de la generación distribuida a la red eléctrica administrada por JASEC. Para este proyecto se establece un estudio a un circuito industrial de baja y media tensión.

En el caso del primer objetivo, se lleva a cabo el desarrollo del modelo del circuito Parque industrial, que aloja la información suministrada por el departamento del GIS de JASEC.

Para el cumplimiento del segundo objetivo propuesto, se tiene el modelo del circuito finalizado, al cual se le realiza un estudio con criterios de corriente a baja escala utilizando herramientas de simulación como el software etap®; para este caso, se pretende obtener el comportamiento del circuito industrial y el conocimiento del estado actual de la red.

Para el tercer objetivo se pretende desarrollar simulaciones de flujos de potencia y tensión en el circuito industrial en cuestión, utilizando el modelo proporcionado por JASEC, con el fin de obtener la capacidad de penetración de generación distribuida a la red a gran escala. En este caso, se pretende obtener un estimado de la cantidad de recurso energéticos distribuidos que se puedan integrar cumpliendo con criterios de seguridad, eficiencia y efectividad, para así cumplir con lo establecido en la Ley 10086.

Una vez que se determine el estimado de capacidad de penetración de recursos energéticos distribuidos en el circuito industrial de estudio, se pretende estimar el impacto que puedan llegar a tener diferentes escenarios en los cuales se integra GD, por lo que se espera obtener un resultado de análisis financiero, para que la institución tenga información útil que funcione como base para la toma de decisiones en futuras inversiones.

1.8. Viabilidad

El presente proyecto tiene como objetivo realizar el modelado de un circuito de distribución industrial de la empresa distribuidora JASEC, donde se han desarrollado otros proyectos similares, como es el caso del trabajo que lleva como título Estudio del comportamiento de una red de distribución monofásica en 34,5 kV para el análisis de la penetración de recursos distribuidos de generación solar en la red eléctrica de JASEC, mediante la aplicación de la Ley 10086, elaborado por Kervyn Sáenz González en el primer semestre de año 2023 [13], así como los trabajos de Edgar Darío Brenes-Fallas [11] y José Pablo Morales-Hernández, en el segundo semestre del 2023 [10], los cuales también se basan en estudios técnicos de la integración de GD y simulación en los circuitos de distribución de la empresa JASEC.

Dado que ya se han desarrollado otros proyectos similares en la empresas JASEC, se cuenta con variada información previamente recolectada, la cual permite tener una visión más clara de la situación actual de la empresa distribuidora con respecto al desarrollo de simulaciones de circuitos de distribución de la zona de Cartago. Además, en los mismos documentos se presentan recomendaciones claras sobre hechos acontecidos durante el desarrollo de los proyectos, ayudando a desarrollar una ruta óptima para la obtención de simulaciones y estudios técnicos futuros, y esto permite un desarrollo más ágil del presente proyecto.

Una herramienta indispensable para poder desarrollar el presente proyecto es el software de simulación etap®, del cual el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) posee licencias, con limitación de máximo mil barras, esto permite que el programa pueda ser utilizado por parte de sus estudiantes y en proyectos de graduación. Además, es necesario contar con otros software como los son Python, de descarga libre, ya que se necesitan herramientas de análisis de datos, por lo que este recurso se vuelve en una herramienta muy útil y de fácil acceso.

Con respecto a la información de las características de los circuitos de distribución de la empresa JASEC, se cuenta con el apoyo del Ing. Cristian Acuña Brenes, Director de la Dirección de Operaciones, y los diferentes departamentos de la institución, así como el respaldo académico de los profesores del área eléctrica de la Escuela de Electromecánica del ITCR, como el M.Sc. Gustavo Gómez Ramírez, quienes velan por un desarrollo y una finalización eficiente del proyecto por medio de valiosos aportes.

Por todo lo previamente expuesto, se considera que el proyecto de modelado y simulación de un circuito de distribución industrial para JASEC en Cartago, dentro de un entorno georreferenciado, es viable.

1.9. Administración del riesgo

Para desarrollar el presente proyecto, se hace indispensable contar con información brindada por la empresa JASEC, así como diferentes herramientas informáticas como los son el software Python y etap[®], ya que el análisis de los datos y modelado de los circuitos se desarrolla específicamente con ayuda de medios digitales utilizando una computadora con una capacidad de procesamiento de información adecuada para el trabajo por realizar, el cual es demandante en criterios de software y hardware.

Con respecto a la información que se debe recolectar, se establece un máximo de tres semanas desde el inicio del proyecto, para que la empresa JASEC brinde la totalidad de los datos necesarios para desarrollar el catálogo del circuito; de esta forma se asegura que el tiempo para llevar a cabo cada tarea establecida se cumpla y, de no ser así, se procede a realizar el procedimiento de depuración y análisis de datos con la información disponible para no afectar las metodologías siguientes.

Dado que para el desarrollo de varios objetivos del proyecto se necesitan herramientas de software como Python y etap[®], se pretende utilizar la licencia del software disponible para uso de estudiantes del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR); de no ser posible utilizar esta licencia, se procederá a consultar con el profesor MSc. Gustavo Gómez Ramírez, para buscar una alternativa para el uso del software. Relacionado con el software Python, se pretende descargar el programa en el dispositivo de cómputo disponible para el desarrollo del trabajo. Este software es de licencia libre; por lo tanto, no se prevé algún tipo de inconveniente asociado y, de presentarse problemas en la instalación, se plantea consultar por alguna guía o recomendación en el Departamento de Administración en Tecnologías de Información y Comunicaciones (DATIC) del ITCR.

Al considerar que el dispositivo de cómputo necesario para realizar las tareas establecidas en el proyecto debe poseer características de software y hardware óptimas, se pretende solicitar a la Biblioteca José Figueres Ferrer el préstamo de un equipo disponible para estudiantes, con las capacidades demandadas para el proyecto, durante el periodo que transcurra desde el inicio del proyecto hasta su finalización.

1.10. Metodología

Con el fin de desarrollar y completar adecuadamente el presente proyecto, se implanta una metodología estructurada, basada en establecimiento de tareas específicas asociadas a cada uno de los objetivos previamente descritos, los cuales deben ser desarrollados y alcanzados en su totalidad; las tareas se llevan a cabo en un orden lógico y secuencial, asegurando que cada una de ellas sea cumplida.

Se inicia con el desarrollo del modelo del circuito Parque industrial, donde se debe considerar toda la información alojada en los archivos del GIS de JASEC, se realiza una extracción de información y se procede a configurar cada uno de los elementos del circuito en el software etap[®].

Al seguir lo fijado por el segundo objetivo de este proyecto, se recolecta la información específica de cada uno de los elementos y cargas del circuito que componen el ramal industrial en estudio; esta información se pretende obtener bajo criterio técnico y basada en datos suministrados por los departamentos correspondientes de la empresa JASEC, y el modelo del circuito a baja escala, tomado en consideración, se simula en el software etap[®], de acuerdo con criterios de corriente.

Cuando se tenga la información necesaria ya recolectada, se procede a realizar un estudio de capacidad

de penetración segura de generación distribuida a gran escala.

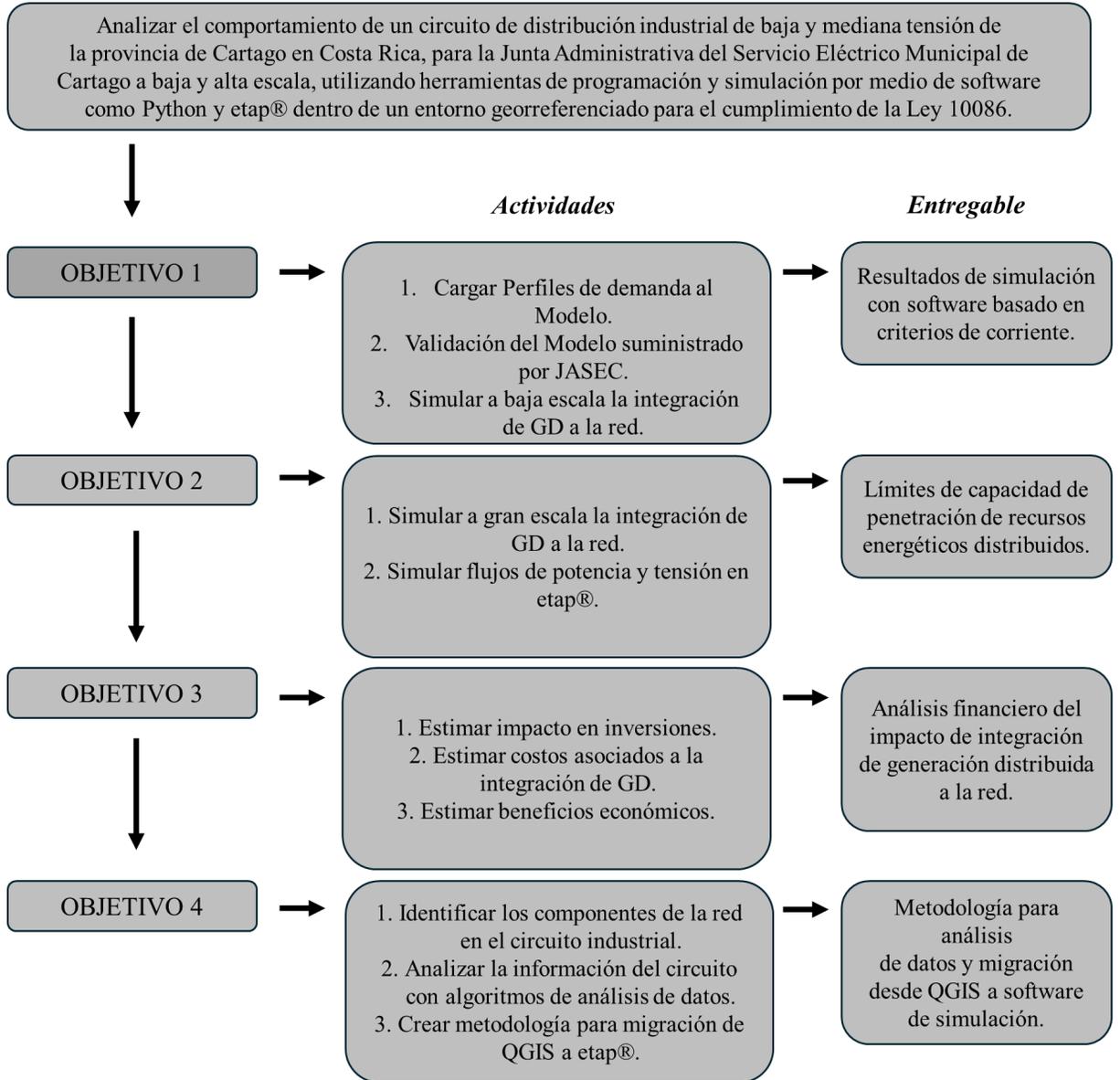
Al tener disponibles las características específicas de los elementos del circuito de estudio, se procede a desarrollar un estimado del perfil de demanda actual en la red; esto se lleva a cabo utilizando como base los datos suministrados por los medidores, además de utilizar criterios de proyección a largo plazo, considerando un crecimiento a futuro del sistema. Las simulaciones a gran escala del modelo se desarrollan en el software etap[®], por medio de análisis de flujos de potencia y tensión.

Al conocer los estudios de perfil de demanda y con la información alojada en la base de datos del circuito, se inicia un proceso de revisión de costes y ganancia de la integración de GD a la red. Además, se realiza un análisis de calidad con respecto a la capacidad de la red estudiada; este proceso permite que se pueda dar la evaluación del cumplimiento con lo requerido en la Ley 10086, además de un análisis de tipo económico para la estimación y cuantificación del impacto en futuras inversiones llevadas a cabo en los circuitos de la red eléctrica, por la empresa JASEC.

Tabla 1.1: Metodología para el desarrollo del Trabajo Final de Graduación

Objetivo específico	Actividad por realizar	Fuente de información	Resultados esperados (Indicador de logro)
Objetivo específico 1:	-Identificar los componentes de la red en el circuito industrial. -Analizar la información del circuito. -Crear modelo del circuito en etap®	Departamento del GIS de JASEC	Modelo para la simulación del circuito Parque Industrial.
Objetivo específico 2:	-Cargar Perfiles de Demanda al Modelo. -Validación del Modelo suministrado por JASEC. -Simular a baja escala la integración de GD a la red.	Departamento de Cobro. Servicios Técnicos. Departamento GIS de JASEC.	Resultados de simulación con software basado en criterios de corriente.
Objetivo específico 3:	-Simular a gran escala la integración de GD a la red. -Simular Flujos de Potencia y Tensión en etap®.	Resultados del objetivo específico 1	Límites de capacidad de penetración de recursos energéticos distribuidos.
Objetivo específico 4:	-Estimar impacto en inversiones. -Estimar Costos Asociados a la integración de GD. -Estimar beneficios económicos.	Resultados de Objetivos específicos 1 y 2	Análisis financiero del impacto de integración de generación distribuida a la red.

Objetivo General



Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Generación distribuida

Según la IEA (International Energy Agency), se entiende la generación distribuida como "la producción de energía eléctrica en instalaciones de consumidores o empresas distribuidoras, de forma que se entrega energía a la red de distribución de forma directa, utilizando equipos como turbinas, pilas de combustible, paneles solares, entre otros tipos de tecnologías"; otras organizaciones como la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), define la GD como "la instalación de generación eléctrica que se conecta al sistema eléctrico de distribución por medio de un punto de conexión común"[14].

Aunque se tienen diferentes definiciones del término, las diferentes organizaciones que han discutido la GD coinciden en que son instalaciones de generación de energía eléctrica descentralizadas, que se conectan a la red de distribución y pueden ser clasificadas desde micro hasta gran escala, según la potencia con la que trabajan.

Dado que con la integración de recursos energéticos distribuidos a la red eléctrica el comportamiento del intercambio de flujos de energía es muy dinámico; por consiguiente, debe regularse de alguna forma el funcionamiento y la legislación que rige el nuevo comportamiento de consumo de los clientes y la empresa administradora del servicio eléctrico, esto debido a que se presentan repercusiones económicas y legales importantes; además, en aspectos técnicos se debe asegurar un funcionamiento óptimo de la red después de integrar GD, ya que el sistema puede presentar problemas de estabilidad por los cambios en los flujos de potencia en los circuitos [15].

2.1.1. Tecnologías de Generación Distribuida

En la actualidad, existe una amplia variedad de tecnologías que pueden ser utilizadas para poder generar energía eléctrica de forma descentralizada; aunque existen tecnologías que utilizan combustibles como el petróleo o gas natural, actualmente la GD se enfoca en fuentes de energía renovables, como paneles fotovoltaicos, turbinas hidroeléctricas, parques eólicos, biomasa o geotérmica [16].

A pesar de la gran cantidad de tecnologías disponibles para la instalación de GD, se presenta una tendencia en el uso de paneles fotovoltaicos, esto debido a aspectos como durabilidad, ahorros en factura eléctrica, bajo mantenimiento, entre otros; cada vez existen más proyectos relacionados con la producción de energía fotovoltaica ya sea en empresas o para autoconsumo en hogares [10].

2.1.2. GD con paneles solares

Los paneles solares se pueden definir como unidades fotovoltaicas modulares, que realizan la captación de radiación solar para realizar una conversión de energía solar a energía eléctrica; se conforman por celdas con células solares fabricadas de diferentes materiales semiconductores (generalmente de silicio). Estas células se encargan de transformar los fotones que inciden sobre la superficie de los paneles en energía eléctrica, que posteriormente puede ser consumida por un hogar o una industria [16]. En la figura 2.1 se puede observar un diagrama resumido de la producción de energía eléctrica con paneles solares.

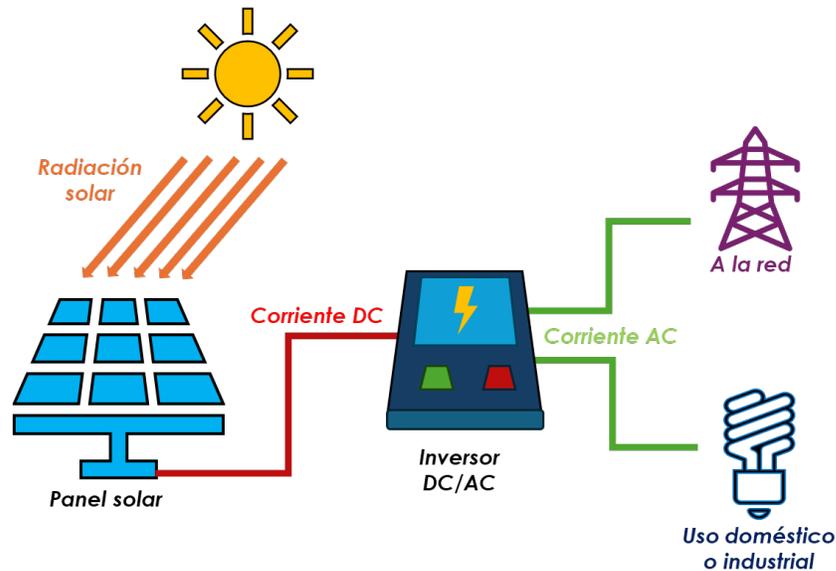


Figura 2.1: Funcionamiento de un panel solar. Fuente: Autoría propia

Para poder obtener la energía resultante de un panel solar, se necesitan diferentes elementos clave interrelacionados, los cuales facilitan la captación y distribución de la energía. Algunos de ellos se presentan a continuación:

- Paneles solares: son el principal elemento de captación de energía solar; se componen de células fotovoltaicas que permiten producir corriente continua durante el periodo diurno.
- Inversor: este dispositivo permite cambiar la corriente continua producida por las células a corriente alterna.
- Panel eléctrico: cuando la energía producida es ajustada para obtener corriente alterna, se alimenta desde el inversor el tablero para realizar la distribución hacia los diferentes aparatos que se tengan instalados.
- Baterías solares: en ocasiones se prefiere almacenar la energía producida por los paneles solares; en este caso, la batería funciona como un acumulador eléctrico, el cual permite utilizar la energía en cualquier momento deseado y no necesariamente durante el proceso de generación. Este dispositivo no está presente en todas las instalaciones con paneles solares.
- Medidor bidireccional: para poder registrar la cantidad de energía producida por los sistemas solares y la que se consume de la red eléctrica se utiliza un medidor bidireccional; de esta forma se tiene un registro eficiente de consumo y producción en una instalación eléctrica.

2.1.3. Potencial eléctrico fotovoltaico

Al utilizar datos del Global Solar Atlas (GSA) se realizó, en el 2020, una comparación entre países, para determinar el potencial fotovoltaico mundial, el "Global photovoltaic power potential by country". De acuerdo con los resultados arrojados por el estudio, se puede generar un mapa de potencial eléctrico fotovoltaico para Costa Rica (ver figura 2.2). Según la leyenda inferior presente en la figura, hay, en colores con una tonalidad fuerte, regiones con alto potencial, como lo son Guanacaste, Pacífico Central y regiones del Valle Central.



Figura 2.2: Potencial Eléctrico Fotovoltaico en Costa Rica. Fuente: [1]

2.1.4. Tipos de GD

Al considerar el fin con el que se realiza la instalación de la generación distribuida en la red, se puede clasificar en diferentes tipos, los cuales presentan diferencia importante que se deben considerar al momento de estudiar el desarrollo de un proyecto de GD [10].

- GD para autoconsumo: esta modalidad de generación distribuida se diseña según la necesidad de consumo del cliente, por lo cual debe existir una relación directa entre demanda y generación. Para estos casos, puede resultar conveniente la instalación de baterías solares como sistema de almacenamiento.
- GD con venta de excedente: para este caso de GD no es necesario que exista una relación entre consumo y generación, ya que la sobreproducción de energía proveniente de los paneles solares u otra tecnología se inyecta a la red, de forma que se obtiene un beneficio económico por la venta de electricidad producida según tarifas.

2.2. Ley 10086

En Costa Rica existe la Ley 10086: Promoción y regulación de recursos energéticos distribuidos a partir de fuentes renovables, cuyo objetivo principal es establecer las condiciones para la promoción y regulación

para una integración eficiente, segura y sostenible de recursos energéticos distribuidos. En el documento también se establecen lineamientos para los entes gubernamentales asociados a la actividad, las empresas distribuidoras y los usuarios [1].

Con la Ley 10086 se tiene un marco legal para la generación de electricidad utilizando recursos energéticos distribuidos a partir de fuentes renovables, donde se permite la entrega de excedentes a la red.

2.2.1. Tarifas de generación distribuida

Desde el mes de octubre del 2023 empezaron a regir las tarifas asociadas a la generación distribuida, donde se establece cuáles son los cuatro conceptos por considerar dentro de la metodológica de pago y cobro para los abonados de los circuitos de distribución de cada una de las empresas que brindan servicios eléctricos en el país [11]. La descripción general de cada una de estas tarifas se presenta a continuación:

- Tarifa de interconexión: esta tarifa se aplica cuando un usuario de la red tiene interés en instalar un sistema de generación en su casa o negocio; la persona interesada debe realizar la solicitud inicial del servicio, para luego continuar con un estudio de ingeniería que contempla inspección inicial, final y durante la puesta en marcha del sistema.
- Tarifa de acceso: se calcula tomando en cuenta el consumo natural del usuario, donde se debe considerar la cantidad de energía consumida por medio del servicio de GD y la red eléctrica de la empresa distribuidora.
- Tarifa de compra/venta de excedentes: esta tarifa se debe considerar en casos donde se acuerde con el abonado la compra de los excedentes de la producción de energía del sistema de GD.
- Tarifa T-DER: para la determinación de monto para el concepto de tarifa T-DER, se debe conocer la potencia instalada del sistema de GD, de forma que por cada kW instalado cobra un monto establecido.

Capítulo 3

Modelo del circuito

El desarrollo del modelo del sistema resulta en la base fundamental sobre la cual se lleva a cabo el estudio de capacidad de penetración de recursos energéticos distribuidos. Dada la importancia de este primer paso, resulta indispensable analizar de manera ordenada y precisa la información suministrada por los diferentes departamentos de la empresa distribuidora, obteniendo de esta forma un gemelo digital del circuito de estudio, el cual refleje lo que sucede y pueda suceder en la realidad de la manera más acertada posible.

3.1. Descripción del circuito

El circuito considerado en el estudio es el 270, identificado como Parque Industrial. Este circuito es alimentado por medio de la subestación Tejar, ubicada en Tejar del Guarco, en Cartago. Los valores de tensión para este circuito son 34,5 kV para el primario trifásico, 240 V y 480 V para el secundario, según corresponde para los diferentes tipos de cargas presentes en el sistema. El circuito parque industrial cuenta con cargas de tipo residencial y comercial, pero se destaca principalmente por ser un circuito de tipo industrial.

Para la realización del modelo se consideran dos regiones principales, las zonas conocidas como parque industrial ZETA y parque industrial La Lima, las cuales son alimentadas por una red de distribución que viaja de forma paralela a la carretera Interamericana Sur (Ruta 2); en estas dos zonas de interés de encuentra alojada la mayor cantidad de cargas del circuito.

3.1.1. Sistema de Información Georreferenciada (GIS)

Para realizar el desarrollo del modelo del circuito Parque Industrial, se utiliza la información suministrada por el Departamento de Información Georreferenciada (GIS), donde se tiene organizada la información de cada uno de los elementos del circuito con su ubicación geográfica. Para el caso del circuito de estudio hay 33 cargas de media tensión, 38 cargas de baja tensión, líneas de media tensión y baja tensión, 34 transformadores, 3 reclosers y 4 fusibles.

Aunque mucha de la información del circuito se encuentra disponible en los archivos compartidos por el departamento GIS, se procede a realizar el modelo en el software QGIS de la línea de distribución subterránea de la zona franca La Lima, ya que no se encuentra modelada completamente, según lo comentado por el ingeniero Christian Acuña; esto se lleva a cabo para poder obtener un valor de distancia de cable alimentador dentro de la zona franca y asignar esa distancia a las impedancias simuladas en el software etap®.

Para poder realizar la exportación de información de los elementos del sistema desde QGIS a etap®,

se extrae la información de cada capa a hojas de datos.

3.2. Máxima demanda

Es importante destacar que, para realizar el estudio de capacidad de penetración de recursos energéticos distribuidos en el circuito, se estableció un día y hora correspondiente al día de mayor demanda para el año 2023. Se selecciona este año, ya que es el último año del que se tiene información de demanda del circuito para todos los meses.

Después de realizar un análisis de la información suministrada por la distribuidora, se determina que el mes de diciembre presenta el momento de máxima demanda para el circuito. Además, al generar el perfil de demanda del circuito (ver figura 3.1), se determina que corresponde con el día 20 a las 15 horas con 15 minutos, con un valor aproximado de 4,55 MW. Es importante destacar que en el archivo original con la información del sistema SCADA presenta dos picos importantes con consumos superiores a los 9 MW, los cuales se remueven, debido a que según lo comentado por el ingeniero Marco Centeno, esas mediciones no corresponden con un funcionamiento normal del circuito, ya que se presentan por una maniobra temporal ejecutada por la misma empresa distribuidora.

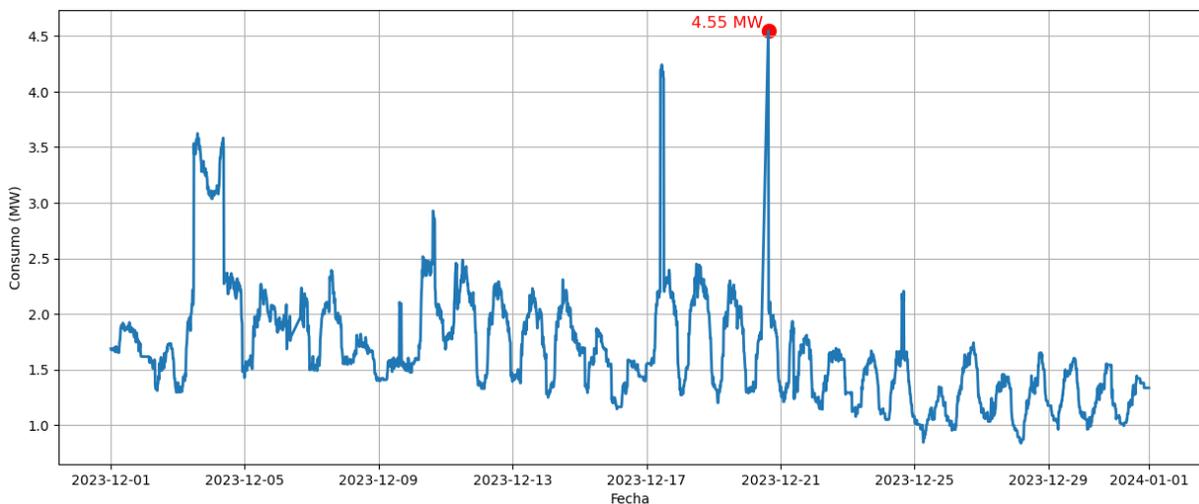


Figura 3.1: Curva de demanda del circuito 270 (Parque industrial) de JASEC. Fuente: Autoría propia

3.3. Elementos del circuito en etap®

Después de haber realizado el debido análisis de datos de información suministrada por el departamento de Información Georreferenciada, se procede a desarrollar el gemelo digital del circuito de parque industrial en el software etap®, donde se cuenta con diferentes elementos de distribución y herramientas necesarias para poder realizar análisis eléctricos en el modelo de interés.

3.3.1. Subestación

Para desarrollar el modelo en etap® de la subestación reductora Tejar, propiedad del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), se utiliza un elemento denominado barra infinita (Power Grid) (ver figura

3.2), de esta forma se alimenta con tensión trifásica de 34,5 kV al circuito de distribución parque industrial. Además, la potencia de corto circuito de la subestación se establece en 627.4 MVA_{sc} configurada como barra oscilante, estos según la información suministrada por la distribuidora (ver figura 3.3).

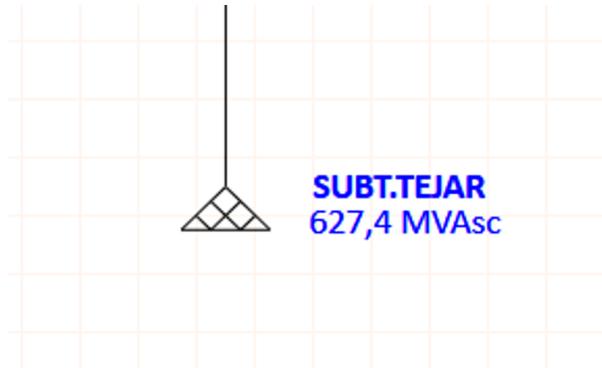


Figura 3.2: Representación gráfica del elemento barra infinita en el software etap®. Fuente: etap®

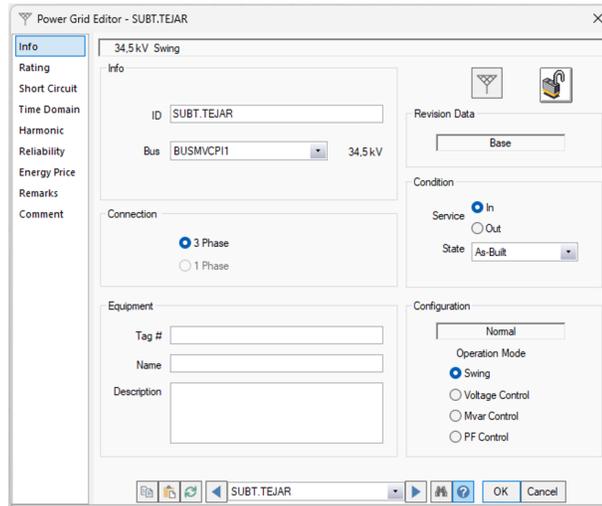


Figura 3.3: Configuración de barra oscilante para la subestación Tejar. Fuente: etap®

3.3.2. Líneas de distribución

Para el circuito de interés se presentan dos tipos de líneas de distribución en el circuito Parque Industrial, aéreas y subterráneas; para modelar en etap® estos elementos se utilizan dos tipos de representaciones, las líneas de transmisión y el cable. Es importante destacar, que a pesar de tener información de calibre de las diferentes líneas no se tiene disponible la información de distribución de cables en postes y parámetros de distancias entre conductores de las líneas subterráneas; por este motivo se optó por utilizar en la líneas aéreas la configuración establecida en el anterior modelo, desarrollado por el Ing. Morales Hernández Pablo (ver figura 3.4), y para las líneas subterráneas se utiliza una configuración muy parecida a la del modelo del circuito Data Center, con cambios en calibre de conductor y distancias.

El calibre que se utiliza para las líneas de distribución aéreas es 394,5 kcmil de aluminio, y para las subterráneas 500 kcmil en cobre. Las diferentes configuraciones realizadas en etap® se pueden observar

en las figuras 3.4, 3.5 y 3.6. Las distancias asignadas como parámetros de configuración de las líneas no superan los 300 metros, siguiendo lo establecido en el documento regulatorio de ARESEP [17].

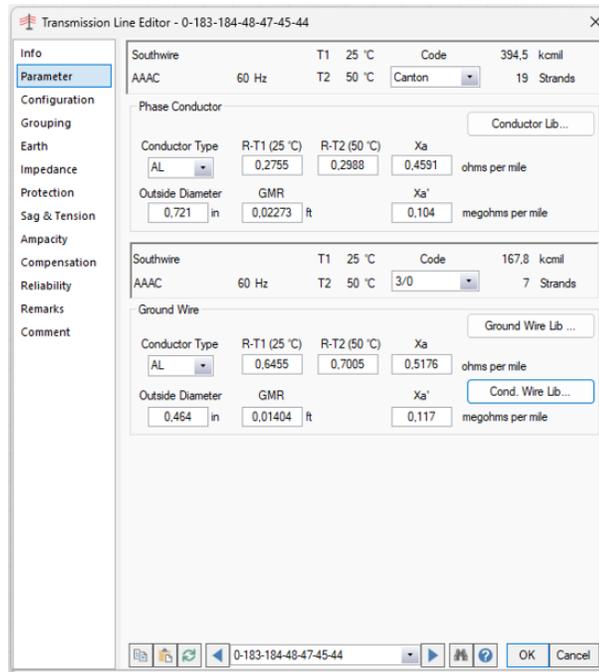


Figura 3.4: Parámetros de líneas de distribución aéreas. Fuente: etap®

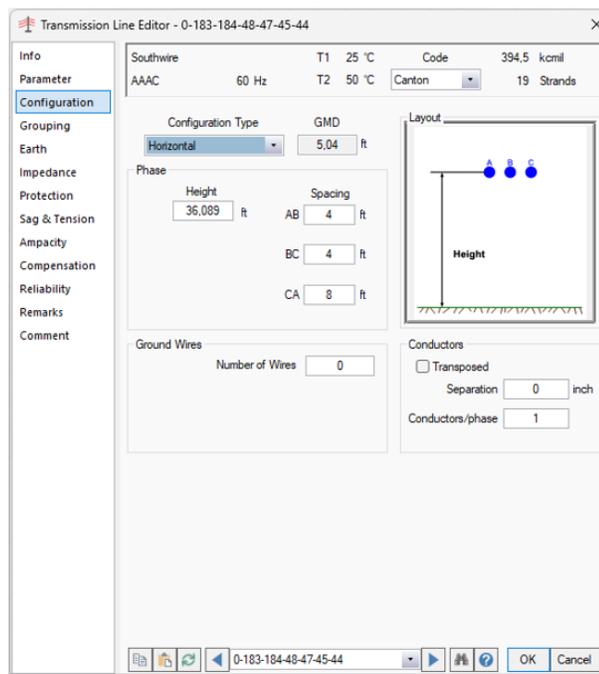


Figura 3.5: Configuración de líneas de distribución aéreas. Fuente: etap®

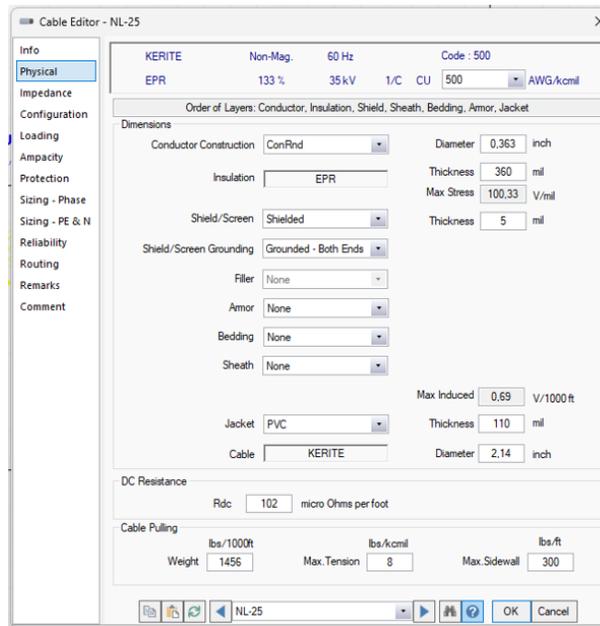


Figura 3.6: Configuración de líneas de distribución subterráneas. Fuente: etap®

3.3.3. Elementos de protección

En el circuito se presentan diferentes elementos de protección como lo son reclosers y fusibles; en el caso de los reclosers se sabe, por información suministrada por JASEC, que se trata con un relé SEL-451, para el caso de los fusibles del circuito no se consideran dentro del modelo, ya que, por alcance del proyecto no se desarrolla un estudio de coordinación de protecciones y la información suministrada por JASEC para estos elementos es nula.

3.3.4. Transformadores

Al momento de modelar los transformadores ubicados dentro del circuito, se realiza el ajuste de acuerdo con los datos suministrados por el departamento GIS, donde se especifica el tipo de conexión y la capacidad asociada. Durante el proceso de análisis de datos de los elementos del circuito alojados en la base de datos del GIS, se observa que falta información de capacidad y tipo de conexión de transformadores de cargas medidas en media tensión; por este motivo se elige conectar un transformador con valores comerciales y capacidades inmediatamente superiores al valor de la demandada de la carga directamente conectada, de esta forma se evita la saturación del transformador.

Para todos los transformadores monofásicos y trifásicos utilizados en el modelo se tiene como tensión del primario 34,5 kV, en todos los casos, y para el secundario valores de 0.208 kV, 0.24 kV y 0.48 kV, dependiendo de la necesidad de cada carga asociada. Además, se configuran como transformadores de aceite mineral, instalados a una altura de 1432.56 metros sobre el nivel del mar y temperatura ambiente de 30°C. En las figuras 3.7 y 3.8 se puede observar la configuración en el software etap®.

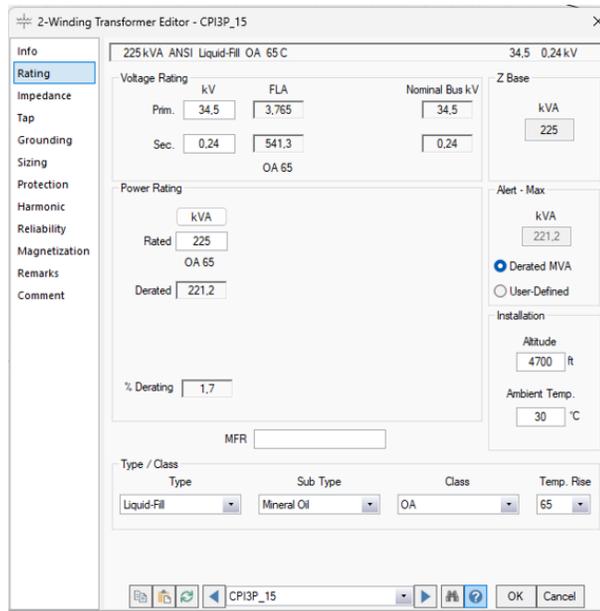


Figura 3.7: Configuración de transformadores. Fuente: etap®

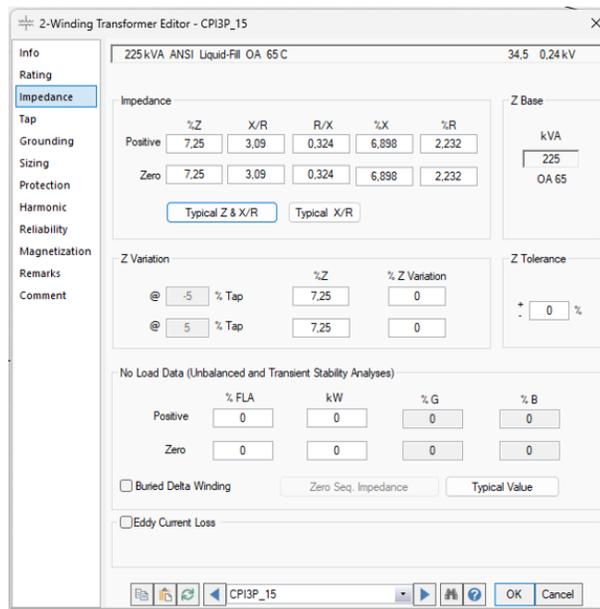


Figura 3.8: Impedancia de transformadores. Fuente: etap®

3.3.5. DER instalados

En el circuito Parque Industrial se encuentran instalados conjuntos de paneles solares, los cuales se configuran como máquinas de inducción tipo generador. Para la información de valores de carga asociados a cada una de los Recursos Energéticos Distribuidos (DER) instalados se desconoce la generación exacta de cada uno de los elementos instalados para el momento escogido de estudio; para asociar un valor lo más cercano al realista se utiliza la tabla de energía generada para el mes de diciembre de JASEC, el valor extraído se convierte en el valor aproximado de energía por día, considerando 31 días.

Para obtener el valor de potencia de cada DER, a la 15:15 horas del 20 de diciembre del 2023, se utiliza la tabla en el apéndice (Ver A.1), donde se tiene la potencia y energía asociada a cada hora del día para un panel solar en Cartago, Costa Rica. Con esta tabla se establece el valor porcentual de energía para intervalos de 15 minutos; dado que se conoce el valor de energía por día de cada DER, se generan los perfiles de generación basados en el valor esperado en PU.

Al observar el comportamiento entre los valores de energía y potencia de la tabla en el apéndice A.1, se observa la relación aproximadamente lineal de potencia en función de energía; así se genera una aproximación de potencia según energía suministrada para cada DER del circuito a las 15:15. En la figura 3.9 se puede observar el perfil de generación para los DER instalados en el circuito.

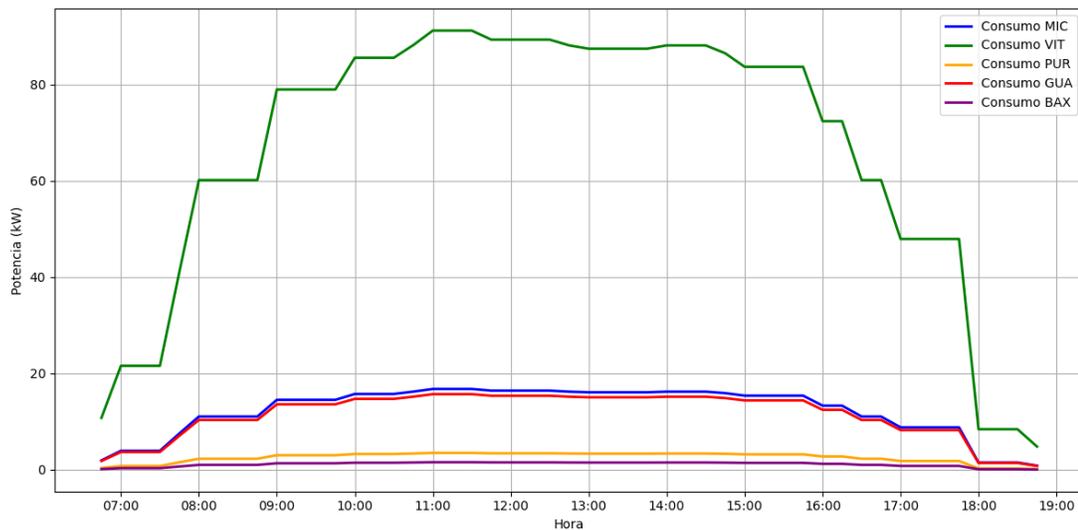


Figura 3.9: Perfiles de potencia de sistemas de generación distribuida instalados en circuito Parque Industrial. Fuente: Autoría propia

Entre las diferentes configuraciones realizadas en las máquinas de inducción tipo generador, se establece un factor de potencia del 100 %, para solo obtener potencia activa suministrada a la red. Además, según el documento regulatorio de ARESEP [17] el panel solar entrega 120 % de su corriente nominal a fallas de cortocircuito. La configuración de parámetros se puede observar en las figuras 3.10 y 3.11.

3.3.6. Adaptadores de fase

Dado que el circuito presenta cargas monofásicas, es necesario utilizar un elemento integrado en ETAP e identificado como adaptador de fase; de esta forma se puede asignar la fase correspondiente que alimenta a cada cliente. La ventana de configuración del adaptador de fase se puede observar en la figura 3.12.

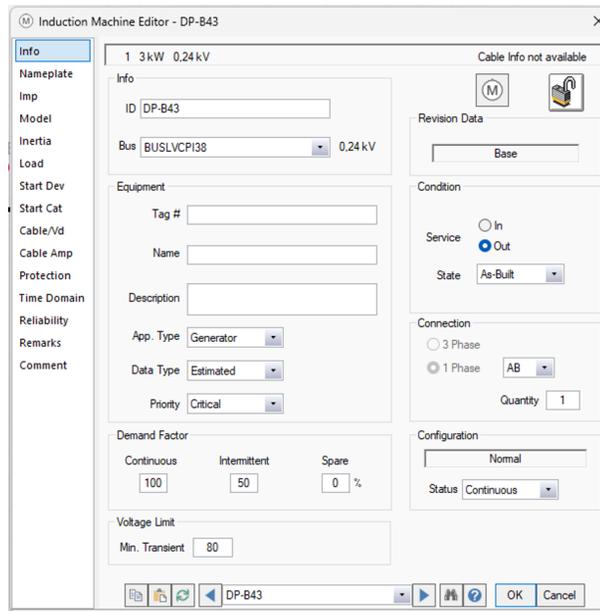


Figura 3.10: Características de la máquina de inducción. Fuente: etap®

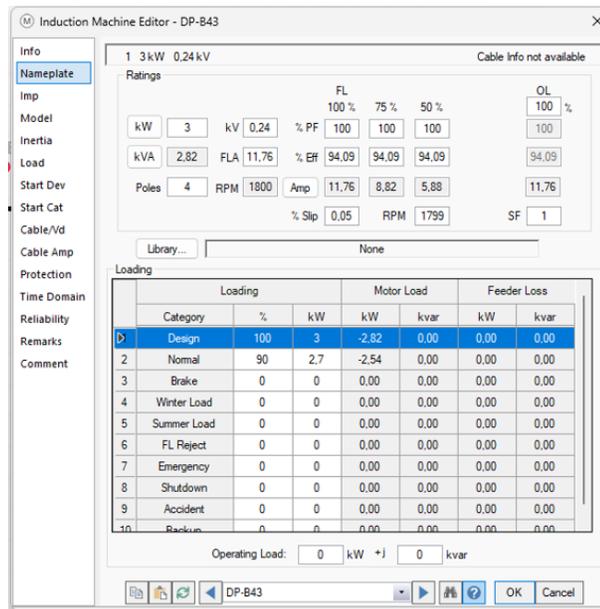


Figura 3.11: Parámetros de la máquina de inducción. Fuente: etap®

Ramales y acometidas

Para el caso de ramales y acometidas se configura el elemento de cable asignando distancias y seleccionando calibres de 1/0 AWG para ramales y 4 AWG en aluminio para acometidas. La ventana de configuración del elemento cable se puede observar en la figura 3.13.

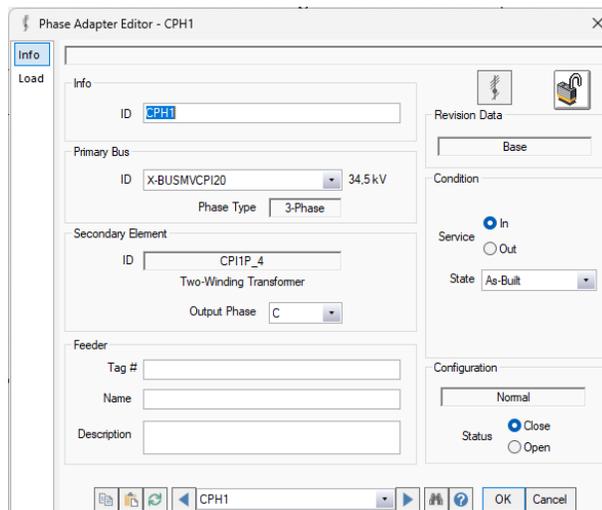


Figura 3.12: Configuración del adaptador de fase. Fuente: etap®

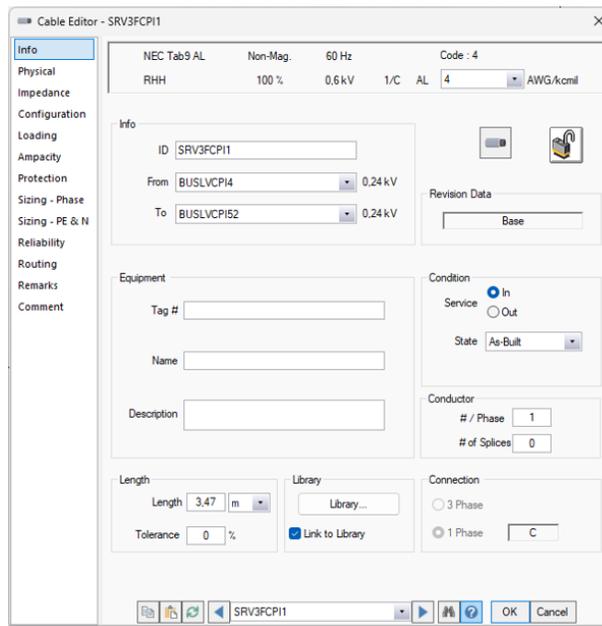


Figura 3.13: Configuración del cable para ramales y acometidas. Fuente: etap®

3.3.7. Cargas de circuito

Para poder asignar los valores de carga correspondientes a cada uno de los clientes del sistema, se utilizó la información alojada en los archivos suministrados por el GIS. Los valores ubicados en las capas de cargas en el circuito de parque industrial contenían el valor de consumo en kWh por mes; por este motivo fue necesario realizar la conversión de datos considerando un día de 24 horas y un mes de 30 días, y el valor de consumo obtenido en kW presentaba el inconveniente de no corresponder con la fecha y hora asignada como el momento crítico de mayor demanda en la red, por lo que se realizó un tratamiento de datos para acercar el valor de la potencia de las cargas al de la fecha seleccionada para el estudio.

Para acercar el valor de consumo del circuito a la magnitud obtenida, de acuerdo con el análisis del

alimentador para el día de máxima demanda, se toman los valores asociados en las capas del GIS para cada cliente del circuito, y se determina el valor porcentual de cada una de las cargas con la relación según el valor de consumo del día desconocido; este valor en partes por unidad de cada carga se multiplica por el valor de máxima demanda del día de estudio.

Es importante considerar también que todas las cargas presentan un factor de potencia asociado; para este caso se establece que las cargas residenciales presentan un factor de potencia del 0.99, las comerciales uno de 0.95 y las industriales uno de 0.9. Según el tipo de carga, se utilizan dos tipos de configuraciones, en el caso de cargas monofásicas se utiliza Static Load y para cargas trifásicas el elemento Lumped Load; un ejemplo de los dos tipos de clientes se puede observar en las figuras 3.14 y 3.15.

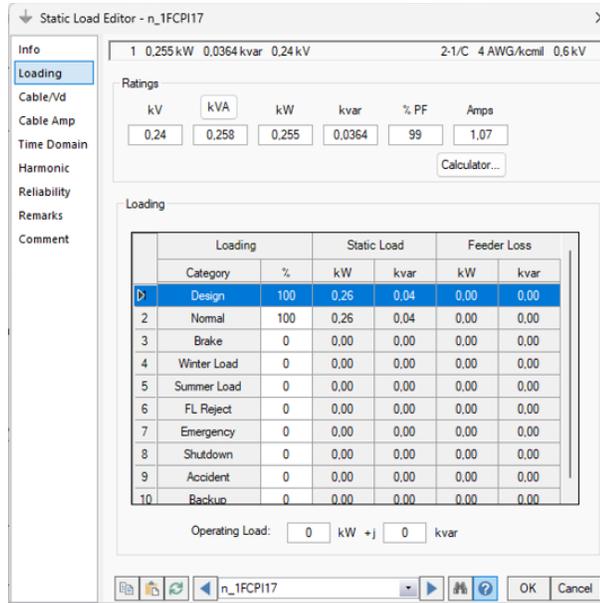


Figura 3.14: Configuración de elemento para cargas monofásicas. Fuente: etap®

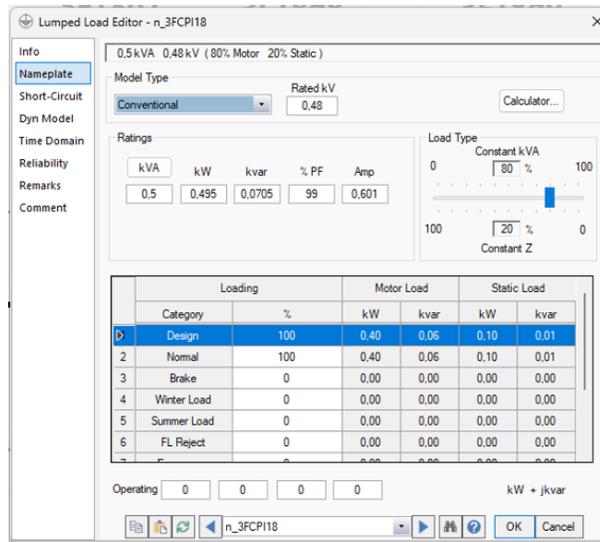


Figura 3.15: Configuración de elemento para cargas monofásicas. Fuente: etap®

3.3.8. Modelo terminado

El resultado final del modelo del circuito Parque industrial se puede observar en la figura 3.16, donde se pueden notar las dos regiones de interés (Parque industrial Grupo Zeta y Zona franca La Lima), unidas por la línea de distribución que viaja sobre la Ruta Interamericana Sur. Es importante destacar que la representación del modelo no se relaciona directamente con una posición geográfica exacta; por este motivo se observa de forma compacta y no escalada entre las regiones, pero esto no resulta en un inconveniente para desarrollar los estudios de capacidad de penetración, ya que toda la información de distancia de conductores se encuentra alojada dentro de los parámetros de las líneas de distribución.

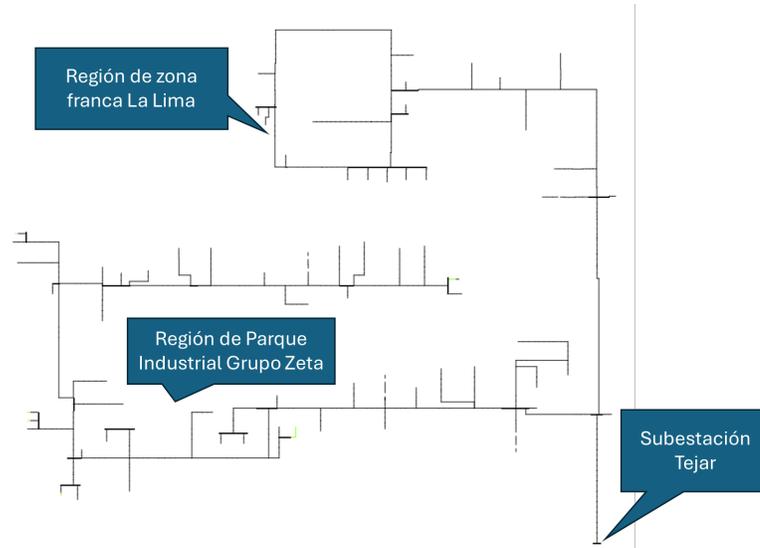


Figura 3.16: Circuito Parque Industrial modelado en etap®. Fuente: etap®

3.4. Evaluación final del circuito

Para verificar que el modelo desarrollado para el circuito funciona de manera correcta, se lleva a cabo una simulación de flujo de potencia. En este caso, como no se presentan errores, se asume que las configuraciones realizadas para cada uno de los elementos del circuito son las adecuadas, y se procede a realizar la metodología para el desarrollo de los estudios de capacidad de penetración en pequeña y gran escala, donde se integran nuevos elementos dentro del circuito, como transformadores y generadores, los cuales se configuran según consideraciones explicada en el capítulo siguiente.

Este modelo finalizado sin casos de integración de GD en el circuito se considera como el caso base de estudio, que genera resultados de flujos de potencia y cortocircuito base, los cuales sirven para realizar comparaciones en algunos de los criterios por considerar para los resultados de estudios de pequeña y gran escala.

Capítulo 4

Estudio de capacidad de penetración de DER

En este capítulo, se desarrolla el estudio del comportamiento del circuito Parque Industrial para diferentes escenarios de integración de recursos energéticos distribuidos. Los resultados de cantidad de DER que se pueden integrar a lo largo de la red de distribución se determina según los criterios de evaluación especificados en la metodología de la Ley 10086, en los cuales se establecen los límites máximos y mínimos permitidos para las diferentes variables eléctricas medidas durante los estudios de flujo de potencia y cortocircuito.

4.1. Escenario de integración de GD a gran escala

Al desarrollar el estudio de capacidad de penetración de GD en gran escala, se puede determinar la cantidad de DER que se pueden alojar en los nodos de media tensión del circuito; por este motivo se eligen 10 nodos trifásico alojados uniformemente a lo largo de la línea de distribución, donde se realizan pruebas buscando el valor aproximado de generación permitido, sin alterar gravemente las características funcionales de la red, al incumplir alguno de los criterios especificados en la metodología aportada por ARESEP.

4.1.1. Configuración del modelo

De acuerdo con la metodología de desarrollo de estudios de capacidad de penetración, se deben elegir al menos 10 nodos trifásicos para el estudio de gran escala; en este caso se eligen solo 10 por cuestiones de tiempo según el cronograma del desarrollo del proyecto. En la elección de los nodos de estudio se considera la ubicación a lo largo del circuito, ya que se pretende seleccionar puntos lo más distribuidos posibles y lo más cercanos a los elementos de protección, esto con el fin de determinar la capacidad de alojamiento de DER sobre todas las regiones que comprenden la línea de distribución.

Para la integración de DER a cada uno de los nodos de estudio, se utilizó el elemento de red compuesta integrado en el software de simulación etap[®], para, de este modo, evitar la saturación en la vista de edición del modelo; cada red compuesta se conecta directamente a la barra de estudio seleccionada, y dentro de la vista del nuevo elemento se integran las nuevas barras, transformadores y generadores. En la tabla 4.3, se puede observar cuáles nodos se eligen para el circuito y cada red compuesta asociada.

Para la generación de escenarios, se debe establecer la cantidad máxima por integrar de DER en el caso base de estudio; de este modo se asigna y configura cada uno de los elementos que se van a integrar.

Tabla 4.1: Nodos seleccionados para el estudio de gran escala y red compuesta asociada

Nodo trifásico	Red Compuesta
BUSMVCPI9	DA
BUSMVCPI20	DB
BUSMVCPI87	DC
BUSMVCPI18	DD
BUSMVCPI57	DE
BUSMVCPI77	DF
BUSMVCPI66	DG
NB0	DH
BUSMVCPI169	DI
BUSMVCPI183	DJ

Según pruebas realizadas en el circuito para la determinación de capacidad máxima por integrar por nodo, se determinó que, por calibre de conductor de la línea de distribución, la capacidad teórica máxima permitida por nodo debe ser de 40 MW, ya que al conectar esta cantidad de generación se incumple el criterio de sobrecarga de conductores en todos los casos.

Dado que en el nodo de estudio se trabaja con una tensión de 34,5 kV, se deben integrar pasos de 1 MW de GD, esto según metodología; además, se debe asignar un transformador trifásico que se ajuste a la capacidad de DER integrado por escenario. Con el fin de facilitar la conexión y desconexión del elemento en cada estudio se utilizan interruptores. En las figuras 4.1 y 4.2, se puede observar ejemplos de cómo se realiza la conexión de los generadores y transformadores dentro de la red compuesta.

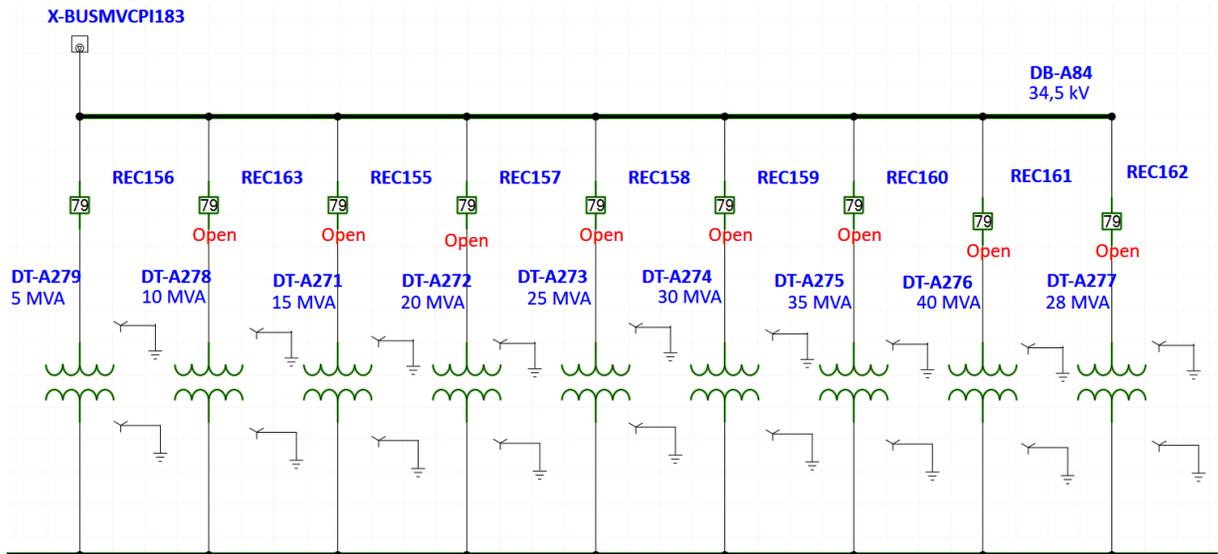


Figura 4.1: Arreglo de transformadores para estudios de gran escala en etap®. Fuente: etap®

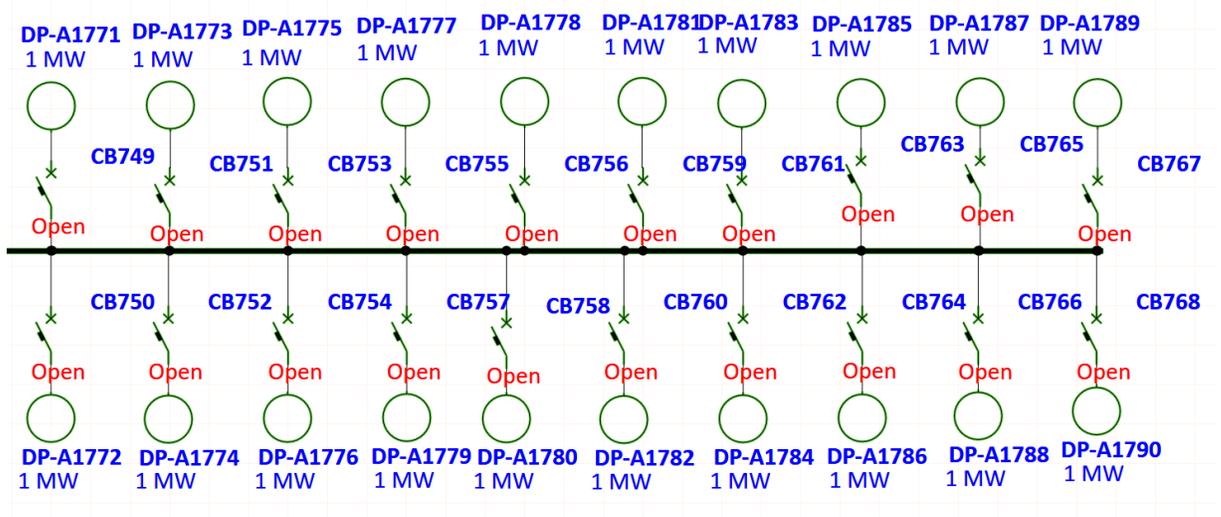


Figura 4.2: Arreglo de generadores para estudios de gran escala en etap®. Fuente: etap®

4.1.2. Escenarios

Para iniciar con el estudio, se deben conocer los resultados de flujos de potencia y cortocircuito, para el caso base de la simulación; ello significa sin integración de nuevo DER en la red, y esto permite realizar comparaciones, como en el criterio de variación de tensión.

Para los escenarios con integración de GD, se realiza un flujo de potencia y uno de cortocircuito según las diferentes configuraciones de integración de DER por nodo. Si se realiza una simulación por cada 1 MW de GD hasta alcanzar los 40 MW, se obtiene una cantidad de estudios difícil de analizar y muy lenta de configurar; por este motivo se elige realizar una inclusión de etapas de 5 MW para cada escenario, de este modo por Nodo solo es necesario correr 9 escenarios desde los 5 MW hasta los 40 MW y un caso extra correspondiente al valor ajustado de respuesta; se establece entonces que se deben realizar 9 estudios de flujo de potencia y 9 de cortocircuito para cada uno de los nodos escogidos, y esto genera 180 escenarios en total.

En etap® se tiene la posibilidad de guardar diferentes configuraciones del modelo; en este caso se crean las configuraciones relacionadas con cada uno de los nodos por estudiar con casos de activación de interruptores para cada uno de los 9 transformadores alojados en la red compuesta (ver figura 4.3).

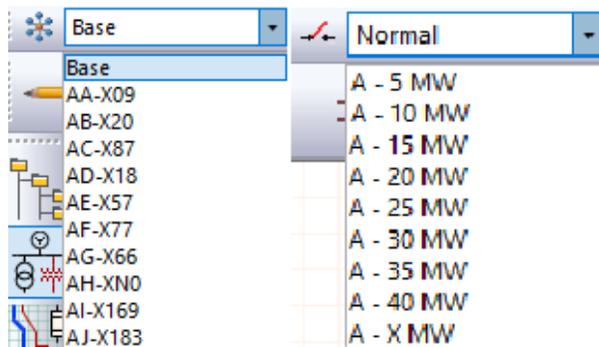


Figura 4.3: Casos de nodos de estudio y activación de interruptores en gran escala. Fuente: etap®

Con el fin de realizar una simulación eficiente de flujos de potencia y cortocircuito, se utiliza la herramienta de Scenario Wizard, donde se permite configurar el tipo de estudio (flujo de potencia o cortocircuito), el nodo asignado y la capacidad elegida; un ejemplo de la ventana de configuración de esta herramienta de etap® se puede observar en la figura 4.4.

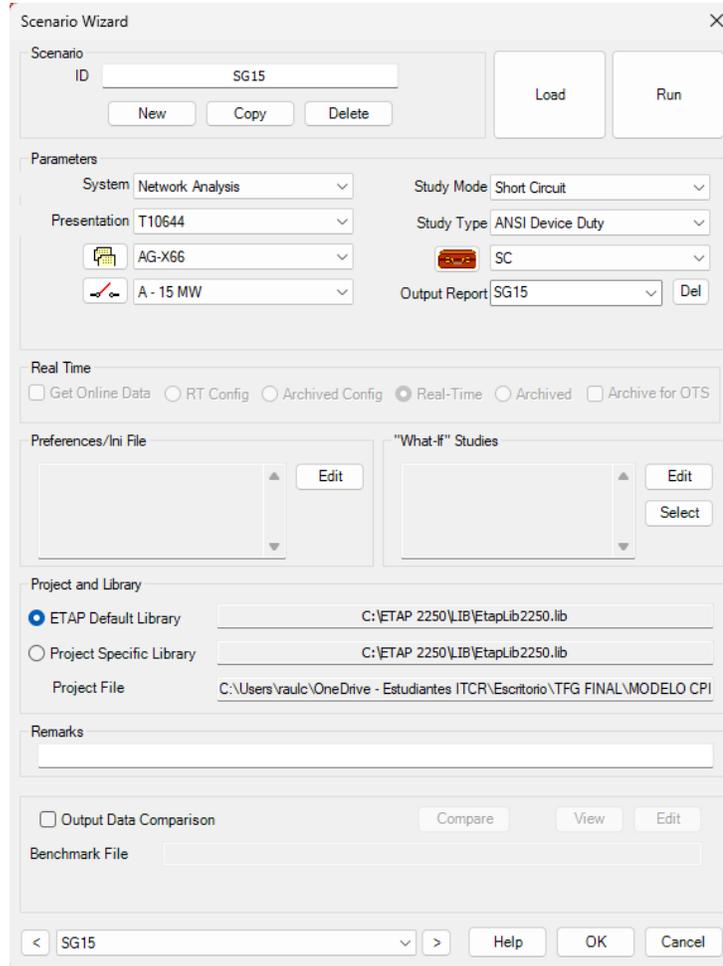


Figura 4.4: Ventana de configuración de Scenario Wizard en etap (Caso gran escala). Fuente: etap®

4.1.3. Resultados

Para analizar cada uno de los criterios en los diferentes escenarios simulados, se utilizan las herramientas de Load Flow Analyzer y ANSI Short Circuit Analyzer, donde se genera una ventana con un reporte de resultados de flujos de potencia y cortocircuito (ver figura 4.5), y la información se extrae en hojas de cálculo para poder analizar los criterios de una forma más precisa; para cada nodo se crea un archivo con las hojas correspondientes a cada uno de los casos de integración de GD.

Para obtener el resultado final de capacidad de penetración en cada nodo, se utilizó el transformador con capacidad variable, el cual se ajusta con cambios de 1 MW de DER desde el caso en el que se incumple un criterio, hasta el caso anterior sin incumplimiento; analizando cada nuevo escenario hasta encontrar el valor exacto de DER que mantenga las variables de los criterios dentro de los rangos permitidos.

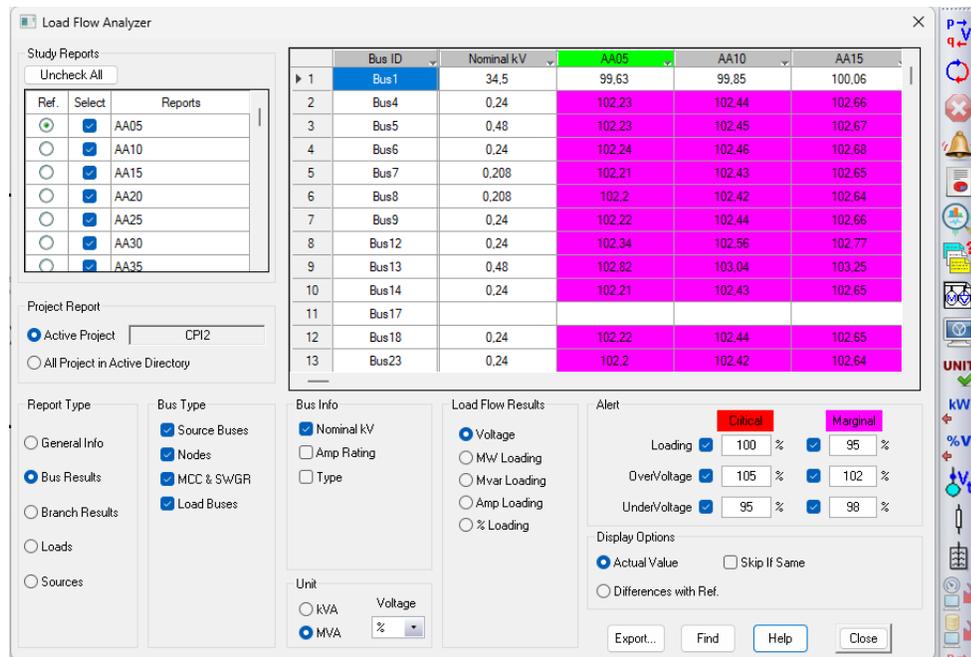


Figura 4.5: Ventana de Load Flow Analyzer en etap. Fuente: etap®

4.2. Escenario de integración de GD en pequeña escala

4.2.1. Configuración del modelo

De una forma similar a como se integró GD en los nodos de media tensión para el estudio de gran escala, se utilizaron redes compuestas en el estudio de pequeña escala; de este modo se evita saturar el modelo con elementos, y se facilita la activación y desactivación de elementos por escenario. Un ejemplo de cómo se distribuyeron los elementos en cada red compuesta de baja escala se puede observar en la figura 4.6. Una diferencia importante en este estudio, es que, dentro de la red compuesta se integra la carga del usuario, ya sea trifásica o monofásica; en cada caso la cantidad de generadores integrados para cada abonado es de 10 cada uno con una potencia del 10% de la capacidad del transformador al que se conecta el cliente. Para realizar la activación y desactivación de generadores en cada escenario, se utiliza un interruptor que se mantiene abierto en el caso base de estudio, para no alterar los resultados de flujo de potencia y cortocircuito.

4.2.2. Escenarios

Los escenarios de integración de GD para el caso de pequeña escala se establecen como un evento identificado como BT y 10 casos de activación de interruptores (ver figura 4.7), lo cual genera 20 escenarios en total (10 de flujo de potencia y 10 de cortocircuito). Al igual que en el caso de gran escala se utiliza la herramienta de "Scenario Wizard", para configurar los estudios de flujo de potencia y corto según porcentaje de integración en cada transformador.

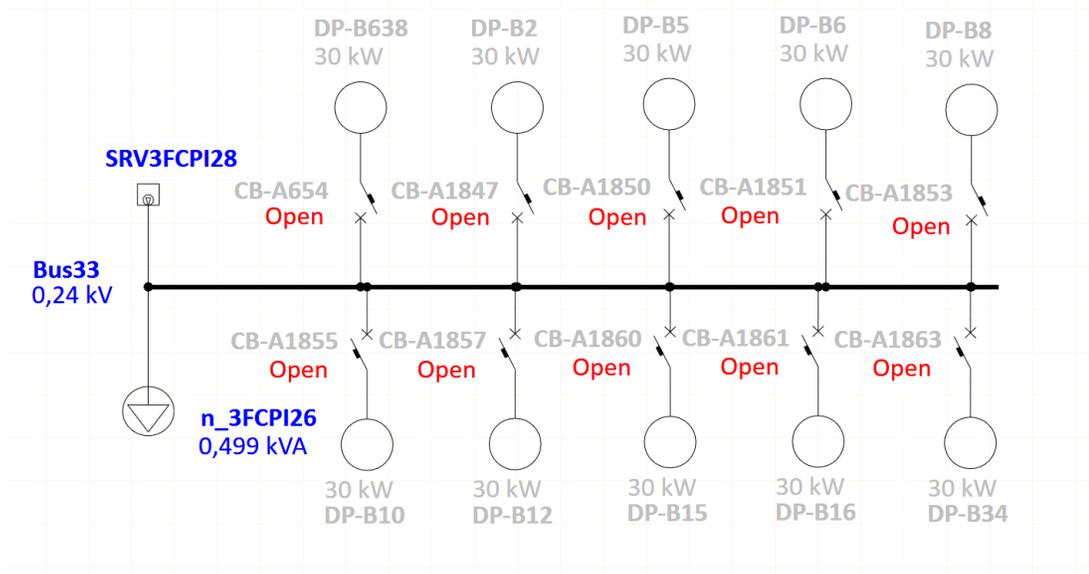


Figura 4.6: Integración de GD en estudio de pequeña escala. Fuente: etap®

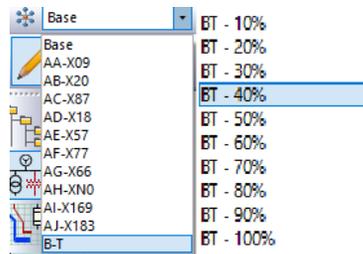


Figura 4.7: Caso de estudio y activación de interruptores en pequeña escala. Fuente: etap®

4.2.3. Resultados

Para analizar los resultados de las simulaciones por escenario configurado, se realizó el mismo procedimiento del caso de estudio de gran escala, donde se extrajo la información a hojas de Excel desde las ventanas de Load Flow Analyzer, así como ANSI Short Circuit Analyzer.

4.3. Criterios de evaluación

Para el análisis de criterios establecidos en la metodología de ARESEP [17], se toman diferentes consideraciones, las cuales se presentan a continuación, ya que por configuración del circuito no se toman en cuenta algunos de los criterios; además, se explica el procedimiento para analizar cada uno de ellos según los resultados de los reportes generados por etap®:

- Aumento de tensiones en régimen permanente: dado que para los clientes del circuito el nivel de tensión se debe mantener en un valor de más menos el 5% de la tensión nominal, se analiza la columna de porcentaje de voltaje determinada directamente por etap®, por lo que el resultado se analiza directamente verificando que no supere los valores máximos.
- Variación de tensión: para el circuito, se establece que el nivel máximo de fluctuación no debe ser

menor o mayor al 3 % en media tensión y al 5 % en baja tensión, de modo que se debe calcular la diferencia de tensiones medidas en el caso base y el escenario actual, obteniendo así un porcentaje de fluctuación con respecto al caso sin DER integrado.

- Desbalance de tensión: según la metodología, el desbalance en las barras trifásicas debe ser menor al 3 %, pero por las características del circuito, las cargas monofásicas corresponden al 0.11 % de la carga total, el resto se trata de cargas trifásicas; esto hace que durante los diferentes estudios de flujo de potencia la tensión no presente un desbalance significativo, por lo que no se considera este criterio a causa de la estabilidad presentada durante diferentes pruebas realizadas en el modelo de etap®.
- Aumento de acciones de control: debido a que según información brindada por JASEC no se cuenta con equipos para el control de la tensión en el circuito de parque industrial, este criterio no se considera para el análisis.
- Sobrecarga de conductores y transformadores: para analizar este criterio, se debe tomar en cuenta que las corrientes no deben exceder el 100 % de la capacidad del conductor a 60°C y en los transformadores no se debe sobrepasar la potencia nominal del transformador, como, según la configuración para cada escenario de integración de DER, nunca se sobrepasa la potencia nominal del transformador, solo se observa la columna de sobrecarga de conductores en los buses del circuito, de forma que no se supere el 100 % de la capacidad en cada uno de ellos.
- Reducción de alcance: se establece que la disminución de la corriente pasante por los interruptores y reconectores no debe superar el 10 %; por este motivo, se debe calcular la diferencia que se presenta entre los valores de corriente en el caso base y el escenario de estudio, obteniendo el porcentaje de variación para el criterio.
- Disparo indebido: debido a que el relé SEL-451, utilizado en el circuito, posee sensibilidad a la bidireccionalidad de la corriente, este criterio no es tomado en cuenta para el análisis de capacidad de penetración.
- Aumento de corrientes de falla: se establece que el aumento de la corriente pasante por los interruptores y reconectores no debe superar el 10 %; por este motivo, se debe calcular la diferencia que se presenta entre los valores de corriente en el caso base y el escenario de estudio, obteniendo el porcentaje de variación para el criterio.
- Coordinación fusible-Interruptor: Este criterio no se considera debido a que la empresa no utiliza esquema salva fusibles.

Tabla 4.2: Criterios de análisis para estudio de capacidad de penetración en Circuito Parque Industrial

Criterio	Valor permitido
Aumento de tensiones en régimen permanente	±5 %
Variación de tensión	±3 % en MT y ±5 % en BT
Desbalance de tensión	N/A
Aumento de acciones de control	N/A
Sobrecarga de conductores y transformadores	< 100 %
Reducción de alcance	< 10 %
Disparo indebido	N/A
Aumento de corrientes de falla	< 10 %
Coordinación fusible-Interruptor	N/A

4.4. Evaluación escenario de gran escala

En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos para cada de uno de los criterios tomados en cuenta para el estudio de capacidad de penetración en el caso de gran escala. Todos los valores se dan en valor absoluto, ya que en diferentes casos se presentan disminuciones y aumentos, pero solo se considera importante que se mantenga un valor dentro de los límites establecidos por la metodología de ARESEP [17].

Para cada tabla se tienen columnas que alojan los resultados para cada uno de los escenarios en los que se integra una cantidad específica de DER, hasta que se incumple un criterio, por lo que la última fila de cada tabla corresponde al valor final de capacidad de penetración para el nodo estudiado.

Tabla 4.3: Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI9

Criterio	5MW	10MW	15MW	20MW	25MW	30MW	34MW
Aumento de Tensiones en Régimen Permanente (%)	4.53	4.31	4.10	3.88	3.67	3.88	3.52
Variaciones de Tensión (%)	0.50	0.60	0.90	1.09	1.30	1.52	1.64
Sobrecarga de Conductores y Transformadores (%)	16.9	30.90	45.30	59.80	74.30	88.80	97.50
Reducción de Alcance (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aumento de Corriente de Falla (%)	1.30	2.70	4.0	5.37	6.72	8.07	8.88

Tabla 4.4: Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI20

Criterio	5MW	10MW	15MW	20MW	25MW	30MW	34MW
Aumento de Tensiones en Régimen Permanente (%)	4.50	4.30	4.10	3.90	3.70	3.90	4.10
Variaciones de Tensión (%)	0.50	0.70	0.90	1.10	1.30	1.50	1.60
Sobrecarga de Conductores y Transformadores (%)	16.50	30.50	44.90	59.40	73.90	88.40	100
Reducción de Alcance (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aumento de Corriente de Falla (%)	1.30	2.70	4.70	5.40	6.80	8.10	9.20

Tabla 4.5: Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI87

Criterio	5MW	10MW	15MW	20MW	25MW	30MW	34MW
Aumento de Tensiones en Régimen Permanente (%)	4.50	4.30	4.00	3.80	3.70	4.00	4.17
Variaciones de Tensión (%)	0.50	0.70	0.90	1.10	1.40	1.50	1.60
Sobrecarga de Conductores y Transformadores (%)	16.50	30.50	44.90	59.40	73.90	88.30	100
Reducción de Alcance (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aumento de Corriente de Falla (%)	1.40	2.80	2.80	5.60	7.00	8.40	9.50

Tabla 4.6: Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI18

Criterio	5MW	10MW	15MW	20MW	25MW	30MW	34MW
Aumento de Tensiones en Régimen Permanente (%)	4.50	4.20	4.00	3.79	3.80	4.10	4.30
Variaciones de Tensión (%)	0.50	0.70	0.90	1.10	1.40	1.60	1.90
Sobrecarga de Conductores y Transformadores (%)	16.50	30.50	44.90	59.40	73.90	88.30	99.80
Reducción de Alcance (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aumento de Corriente de Falla (%)	1.40	2.80	4.30	5.70	7.10	8.60	9.70

Tabla 4.7: Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI57

Criterio	5MW	10MW	15MW	20MW	25MW	30MW	34MW
Aumento de Tensiones en Régimen Permanente (%)	4.50	4.20	4.00	3.80	3.80	4.10	4.30
Variaciones de Tensión (%)	0.50	0.70	0.90	1.10	1.40	1.60	1.90
Sobrecarga de Conductores y Transformadores (%)	16.50	30.50	44.90	59.30	73.80	88.30	99.80
Reducción de Alcance (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aumento de Corriente de Falla (%)	1.50	2.90	4.40	5.80	7.30	8.70	9.90

Tabla 4.8: Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI77

Criterio	5MW	10MW	15MW	20MW	25MW	30MW	33MW
Aumento de Tensiones en Régimen Permanente (%)	4.48	4.22	4.01	3.80	3.82	4.05	4.19
Variaciones de Tensión (%)	0.50	0.70	0.90	1.09	1.53	1.75	1.96
Sobrecarga de Conductores y Transformadores (%)	16.50	30.05	44.90	59.30	73.80	88.20	96.90
Reducción de Alcance (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aumento de Corriente de Falla (%)	1.50	3.00	4.50	5.98	7.48	8.98	9.87

Tabla 4.9: Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI66

Criterio	5MW	10MW	15MW	20MW	25MW	30MW	32MW
Aumento de Tensiones en Régimen Permanente (%)	4.53	4.31	4.10	3.89	3.69	3.85	3.93
Variaciones de Tensión (%)	0.50	0.80	1.10	1.30	1.69	1.95	1.96
Sobrecarga de Conductores y Transformadores (%)	16.20	28.70	42.20	55.70	69.20	82.60	88.00
Reducción de Alcance (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aumento de Corriente de Falla (%)	1.50	3.00	4.60	6.09	7.62	9.15	9.76

Tabla 4.10: Criterios de estudio para escenarios en nodo NB0

Criterio	5MW	10MW	15MW	20MW	25MW	28MW
Aumento de Tensiones en Régimen Permanente (%)	4.53	4.31	4.11	3.90	3.71	3.78
Variaciones de Tensión (%)	0.50	0.90	1.30	1.73	2.17	2.40
Sobrecarga de Conductores y Transformadores (%)	15.50	28.70	42.10	55.50	68.90	79.60
Reducción de Alcance (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aumento de Corriente de Falla (%)	1.70	3.40	5.20	6.90	8.62	9.98

Tabla 4.11: Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI169

Criterio	5MW	10MW	15MW	20MW	25MW	26MW
Aumento de Tensiones en Régimen Permanente (%)	4.53	4.32	4.11	3.92	3.74	5.48
Variaciones de Tensión (%)	0.70	1.30	2.00	2.60	3.04	2.59
Sobrecarga de Conductores y Transformadores (%)	17.10	33.88	50.40	66.80	83.10	95.9
Reducción de Alcance (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aumento de Corriente de Falla (%)	1.90	3.80	5.70	7.64	9.56	9.86

Tabla 4.12: Criterios de estudio para escenarios en nodo BUSMVCPI183

Criterio	5MW	10MW	15MW	20MW	25MW	28MW
Aumento de Tensiones en Régimen Permanente (%)	4.53	4.31	4.11	3.91	3.71	3.60
Variaciones de Tensión (%)	0.50	0.90	1.50	1.95	2.38	2.59
Sobrecarga de Conductores y Transformadores (%)	18.10	34.60	51.10	67.60	84.10	93.90 0
Reducción de Alcance (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aumento de Corriente de Falla (%)	1.80	3.50	5.30	7.03	8.80	9.86

4.5. Evaluación de escenarios de pequeña escala

Para el caso del análisis de criterios para el estudio de pequeña escala, se realiza el bloqueo de barras que incumplen criterios para cada escenario; esto permite obtener un caso estable de red sin incumplimiento de criterios hasta alcanzar el 100 % de carga de cada uno de los transformadores del sistema; así se llega al final del estudio, donde ya no se agrega más DER, dado que siempre se incumpliría el criterio máximo para transformadores.

En la tabla 4.13, se puede observar que se bloquea por completo cada una de las barras de media tensión del sistema, por incumplimiento de aumento de tensión y el porcentaje de desviación del valor permitido, dado que el análisis se debe realizar para cada uno de los buses del circuito, y se presenta en la tabla solo el valor de incumplimiento de los buses con falla, ya que, si se realiza una tabla por bus se obtendría una gran cantidad de tablas con información que no sería relevante, pues no presentan falla.

Es importante recalcar que el valor de porcentaje de escenario para la tabla 4.13 corresponde con la cantidad de DER que se integra en el bus bloqueado; por ejemplo, en el Bus9 se tiene un escenario de 10 %, lo que significa que solo se permite la integración de un 10 % de la capacidad del transformador conectado a la red compuesta que contiene el Bus9.

Tabla 4.13: Capacidad de Alojar DER por Nodo CPI

Escenario	Buses Bloqueados	Criterio	Valor(%)
10 %	Bus9	Aumento Tensión	5.04
20 %	Bus4	Aumento Tensión	5.75
	Bus25	Aumento Tensión	5.03
	Bus33	Aumento Tensión	5.03
30 %	Bus26	Aumento Tensión	5.19
	Bus6	Aumento Tensión	5.45
40 %	BUSLVCPI51	Aumento Tensión	5.03
	Bus28	Aumento Tensión	5.03
	BUSLVCPI47	Aumento Tensión	5.15
	Bus5	Aumento Tensión	5.02
50 %	BUSLVCPI50	Aumento Tensión	5.28
	Bus14	Aumento Tensión	5.28
60 %	Bus18	Aumento Tensión	5.31
	Bus12	Aumento Tensión	5.16
	Bus13	Aumento Tensión	5.05
70 %	Bus7	Aumento Tensión	5.08
	Bus23	Aumento Tensión	5.06
	BUSLVCPI45	Aumento Tensión	5.04
80 %	-	-	-
90 %	-	-	-
100 %	Resto de Buses	Sobrecarga de Transformadores	100

4.6. Resumen con capacidades de integración de DER.

En la tabla 4.14, se puede observar en resumen la capacidad de alojar DER en cada uno de los nodos estudiados en el caso de gran escala y el criterio de incumplimiento para cada escenario. Es importante recalcar el hecho de que los nombres de los nodos corresponden con la codificación de elemento del GIS.

Tabla 4.14: Capacidad de Alojar DER por Nodo CPI

Nodo	Criterio de Incumplimiento	Capacidad de Alojar DER (MW)
BUSMVCPI9	Sobrecarga de Conductores	34
BUSMVCPI18	Sobrecarga de Conductores	34
BUSMVCPI20	Sobrecarga de Conductores	34
BUSMVCPI57	Sobrecarga de Conductores	34
BUSMVCPI87	Sobrecarga de Conductores	34
BUSMVCPI77	Aumento Corrientes de Falla	33
BUSMVCPI66	Aumento Corrientes de Falla	32
BUSMVCPI183	Aumento Corrientes de Falla	28
NB0	Aumento Corrientes de Falla	28
BUSMVCPI169	Aumento de tensión	26

Para el caso de estudio de pequeña escala, se presentan los resultados en función de la potencia nominal del transformador conectado a los buses que presentan falla. Además, se agrega el criterio de incumplimiento para cada caso, el nombre del transformador corresponde con la codificación utilizada en el GIS, todos los transformadores que no aparecen en la tabla poseen una capacidad de alojamiento del 100 %.

Tabla 4.15: Capacidad de Alojamiento DER por transformador CPI

Transformador	Criterio de Incumplimiento	Capacidad de Alojamiento DER (kW)
CPI3P5	Aumento de tensión	50.1
CPI3P2	Aumento de tensión	45
CPI3P7	Aumento de tensión	100.2
CPI3P9	Aumento de tensión	60
CPI3P19	Aumento de tensión	45
CPI3P4	Aumento de tensión	90
CPI3P1	Aumento de tensión	44
CPI3P10	Aumento de tensión	90
CPI3P15	Aumento de tensión	90
CPI3P3	Aumento de tensión	600
CPI3P17	Aumento de tensión	75
CPI3P6	Aumento de tensión	75
CPI3P11	Aumento de tensión	90
CPI3P14	Aumento de tensión	180
CPI3P18	Aumento de tensión	180
CPI3P12	Aumento de tensión	105
CPI3P8	Aumento de tensión	52.5
MV30	Aumento de tensión	78.75

4.7. Mapa con resultados de capacidad de penetración

Generación del mapa de capacidad de penetración

Como uno de los requisitos establecidos por ARESEP, para la debida presentación de los resultados de capacidad de penetración de recursos energéticos distribuidos, se debe generar un mapa con los resultados de capacidad de los estudios de gran escala y pequeña escala, para que puedan ser fácilmente entendibles y poderse presentar en las páginas web de cada una de las distribuidoras; en este caso, se desarrolla un mapa interactivo que aloja la información de capacidad según elementos georreferenciados utilizando el software QGIS.

Para iniciar con el procedimiento de generación de mapas interactivos, es necesario organizar en archivos de Excel la información que se desea presentar en pantalla; por este motivo, se genera un archivo del estudio de gran escala con una hoja de cálculo que contiene cinco columnas principales, las cuales contienen información de nombre de línea, coordenadas en X (inicio y final), coordenadas en Y (inicio y final), capacidad de alojamiento DER y circuito al que pertenecen. En la figura 4.8, se puede observar un ejemplo de esta hoja de cálculo.

En el caso de pequeña escala se debe realizar un archivo de Excel con 6 columnas principales, donde se

pueda cargar la información de identificación del transformador, capacidad de transformador, capacidad de alojamiento, coordenadas X, coordenadas Y y circuito al que pertenece; en la figura 4.9, se observa un ejemplo.

	A	B	C	D	E
1	LINEA	Capacida	COORD.X	COORD.Y	Circuito
2	NL1	32000	505657,073	1091160,29	270 Parque Industrial
3	NL1	32000	505401,698	1091249,74	270 Parque Industrial
4	NL-13	28000	505080,773	1091343	270 Parque Industrial
5	NL-13	28000	505064,1	1091291,27	270 Parque Industrial
6	NL-15	26000	505064,1	1091291,27	270 Parque Industrial
7	NL-15	26000	504941,271	1091332,35	270 Parque Industrial
8	NL-14	26000	505064,1	1091291,27	270 Parque Industrial
9	NL-14	26000	505002,07	1091116,96	270 Parque Industrial
10	L-14	26000	505002,07	1091116,96	270 Parque Industrial
11	L-14	26000	504956,922	1090985,96	270 Parque Industrial
12	NL15	26000	504956,922	1090985,96	270 Parque Industrial
13	NL15	26000	504955,491	1090960,7	270 Parque Industrial
14	L14	26000	504956,922	1090985,96	270 Parque Industrial
15	L14	26000	505079,58	1090941,1	270 Parque Industrial
16	L16	26000	505079,58	1090941,1	270 Parque Industrial
17	L16	26000	505098,093	1091006,19	270 Parque Industrial
18	NL-16	26000	505079,58	1090941,1	270 Parque Industrial
19	NL-16	26000	505270,364	1090887,21	270 Parque Industrial
20	NL-2	28000	505270,364	1090887,21	270 Parque Industrial
21	NL-2	28000	505319,99	1091011,13	270 Parque Industrial
22	NL-20	28000	505319,99	1091011,13	270 Parque Industrial
23	NL-20	28000	505302,076	1091013,53	270 Parque Industrial
24	NL020	28000	505401,698	1091249,74	270 Parque Industrial

Figura 4.8: Hoja de datos de capacidad para estudio de gran escala. Fuente: Autoría propia

	A	C	D	G	H	I
1	NOMBRE	Potencia nominal [kVA]	Capacidad alojamiento DER [kW]	COORD.X	COORD.Y	CIRCUITO
2	MV7	30		0	505272,151	1089692,29 270 Parque Industrial
3	CPI3P_5	501		50,1	505279,045	1089538,9 270 Parque Industrial
4	CPI3P_2	225		45	505463,748	1089491,37 270 Parque Industrial
5	CPI3P_7	501		100,2	505460,215	1089650,07 270 Parque Industrial
6	CPI3P_9	300		60	505832,882	1091132,89 270 Parque Industrial
7	CPI3P_19	150		45	505459,849	1089652,84 270 Parque Industrial
8	CPI3P_4	300		90	505383,132	1089512,92 270 Parque Industrial
9	CPI3P_1	110		44	505595,693	1089473,14 270 Parque Industrial
10	CPI3P_10	225		90	505502,992	1089632,05 270 Parque Industrial
11	CPI3P_15	225		90	505612,696	1089453,01 270 Parque Industrial
12	CPI3P_3	1500		600	505433,697	1089486,72 270 Parque Industrial
13	CPI3P_17	150		75	505640,433	1089525,35 270 Parque Industrial
14	CPI3P_6	150		75	505233,955	1089627,15 270 Parque Industrial
15	CPI3P_11	150		90	505261,478	1089666,08 270 Parque Industrial
16	CPI3P_14	300		180	505181,983	1089524,73 270 Parque Industrial
17	CPI3P_18	300		180	505134,257	1089638,64 270 Parque Industrial
18	CPI3P_12	150		105	505361,199	1089501,09 270 Parque Industrial

Figura 4.9: Hoja de datos de capacidad para estudio de pequeña escala. Fuente: Autoría propia

Después de generar los archivos de Excel, se cargan al software QGIS como nuevas capas de datos, las cuales se pueden transformar a puntos y líneas con las herramientas integradas, así como configurar la presentación de colores y valores de ordenamiento de resultados.

Dado que la idea es generar una página que se pueda alojar en internet, se utiliza el complemento qgis2web, el cual permite que se puedan realizar mapas interactivos exportados como archivo html; este se aloja en una cuenta personal de github, el cual se puede acceder al entrar en la siguiente dirección web: <https://cpi270.github.io/CPI270/CPI270.html>.

Una vez que se ha abierto el enlace, se presenta en el navegador una nueva pestaña, donde se puede notar el recorrido de la línea de media tensión (líneas) y transformadores del circuito (puntos); cada uno de los elementos del mapa siguen una escala de color, la cual corresponde con la capacidad de alojamiento para cada escenario de integración estudiado (ver figura 4.10).

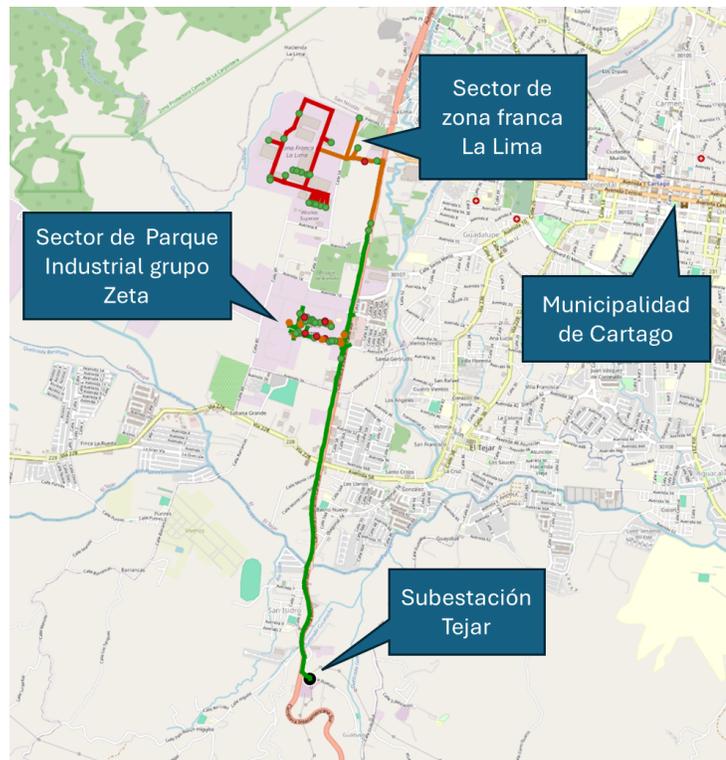


Figura 4.10: Mapa de capacidad de alojamiento de DER para circuito Parque Industrial. Fuente: Autoría propia

En la ventana de visualización del mapa, también se puede observar la escala de clasificación utilizada para las líneas de media tensión (según capacidad) y los transformadores (según porcentaje de alojamiento) (ver figura 4.11).

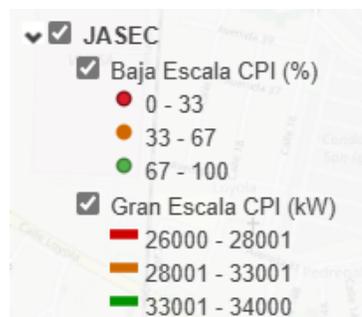


Figura 4.11: Escala de capacidad de alojamiento de DER para circuito Parque Industrial. Fuente: Autoría propia

Como el mapa generado es interactivo, se puede seleccionar cada uno de los puntos y líneas del circuito para observar toda la información asignada a cada elemento del circuito, ya sean transformadores o líneas de media tensión (ver figuras 4.12 y 4.13).

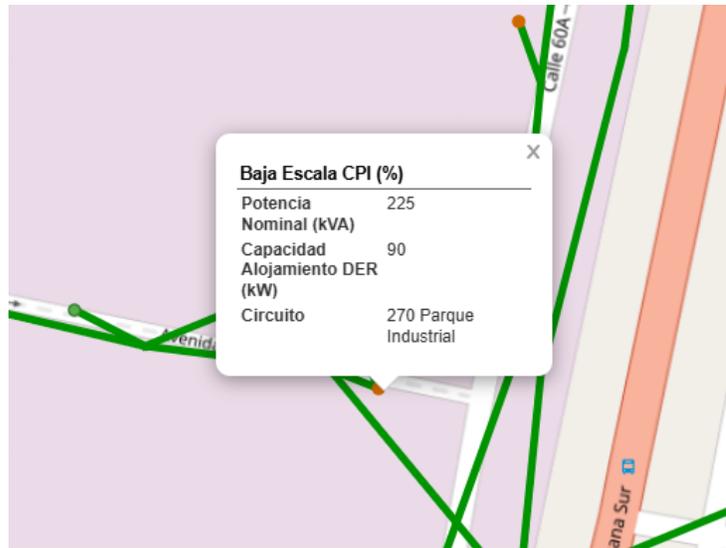


Figura 4.12: Información de capacidad de alojamiento de DER para pequeña escala. Fuente: Autoría propia

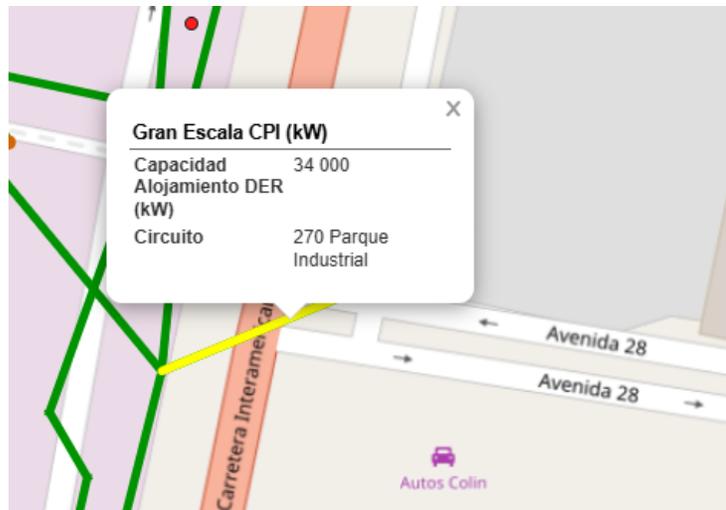


Figura 4.13: Información de capacidad de alojamiento de DER para gran escala. Fuente: Autoría propia

4.8. Tabla resumen de estudios

Según lo establecido por la metodología de ARESEP, se debe generar un reporte final que contenga las diferentes características, configuraciones y límites de criterios analizados en el estudio para cada circuito de la empresa distribuidora. En la tabla 4.16 se puede observar la información de resumen del estudio para el circuito Parque Industrial.

Tabla 4.16: Reporte Circuito Parque Industrial

Clasificación	Parámetro	Valor
Datos del circuito	Tensión en la cabecera	34.5 kV
	Día evaluado	20/12/2023
	Hora evaluada	15:15
	Corriente cortocircuito 3F	12.82 kA
	Corriente cortocircuito 1F	10.50 kA
Criterios de tensión	Tensión máxima permitida	5 %
	Desviación máxima de tensión en baja tensión	5 %
	Desviación máxima de tensión en media tensión	3 %
	Desviación máxima de tensión en nodos controlados	5 %
	Desbalance máximo de tensiones en nodos trifásicos de MT y BT	3 % MT 5 % BT
Criterios térmicos	Nivel máximo de carga en conductores	100 % @ 80°C
	Nivel máximo de carga en transformadores	100 %
Criterios de dispositivos de protección	Aumento máximo de corriente de falla	10 %
	Umbral máximo para esquema salvo fusible	NA
	Máxima reducción de alcance	10 %
Parámetros de simulación en integración de DER de pequeña escala	Paso máximo de nivel de penetración de DER de pequeña escala	250 kW
	Máxima capacidad de DER de pequeña escala a simular	2500 kW
	Aporte de DER a corriente de cortocircuito, con respecto corriente nominal	120 %
Parámetros de simulación en integración de DER de gran escala	Paso máximo de nivel de penetración de DER de gran escala	1000 kW
	Número de nodos de MT trifásicos evaluados	10
	Aporte de DER a corriente de cortocircuito, con respecto corriente nominal	120 %
	Reactancia subtransitoria de generador síncrono	NA
Herramienta computacional	Software	etap®
	Versión	22.5.0C ón 22.5.0.23157

Capítulo 5

Estudio económico

En el presente capítulo, se desarrolla un análisis de impacto económico de la integración de recursos energéticos distribuidos en el circuito de distribución del parque industrial. Para este estudio, el principal aspecto por considerar es el efecto en la reducción de ingresos que JASEC puede presentar según los diferentes escenarios de integración de DER, esto debido a que los diferentes clientes alojados en la red ya no presentan el comportamiento normal de compra de servicios eléctricos.

Es importante destacar el hecho de que este análisis considera solo el caso de integración en baja escala, dado que este es el escenario con el cual se ven más fuertemente afectados los ingresos de venta de potencia y energía a clientes; el caso de gran escala no se toma en cuenta para el cálculo, ya que en esta situación se considera el DER integrado como generadores privados de energía, los cuales venderían a JASEC servicios eléctricos, resultando en cálculos diferentes según las regulaciones nacionales. Además, se deben considerar muchos aspectos legales asociados que no se analizan en este trabajo.

Los cálculos realizados en este apartado del proyecto se desarrollan utilizando un tipo de cambio de dólar de C518.96, el cual corresponde con el monto asociado para el día 27 de setiembre del 2024. Además las tarifas utilizadas en este apartado corresponden a datos consultados para el mismo día en la página oficial de ARESEP.

5.1. Estratégica operativa de JASEC

JASEC es una empresa distribuidora, la cual cumple el rol de intermediario en la prestación del servicio eléctrico para diferentes sectores de la provincia de Cartago. Gran cantidad de la energía eléctrica consumida por los diferentes circuitos que la empresa posee se compra al ICE, y otra parte se mantiene con proyectos de generación propios. Para el caso de estudio, se decide considerar que el 100 % del consumo eléctrico del circuito Parque Industrial corresponde a energía comprada al ICE; de esta forma se simplifica el cálculo, ya que, si se integra el valor de la energía generada por la se deberían considerar muchos aspectos relacionados con el funcionamiento de las plantas de JASEC, esto sería inviable para el cumplimiento del alcance del trabajo.

5.2. Costos mensuales

Para el establecimiento del caso base de estudio, se consideran los valores de energía y potencia según la información brindada por el departamento de cobros de JASEC, donde se tienen los valores de consumo de energía y potencia para el circuito Parque Industrial. En la tabla 5.1 se pueden observar las tarifas de compra de energía, consultadas en la página oficial de ARESEP; y en las tablas 5.2 y 5.3 se presentan los

montos mensuales de costo de compra de servicios eléctricos por concepto de energía y potencia.

Tabla 5.1: Tarifas para compra de energía y potencia

Horario	Energía (kWh)	Potencia (kW)
Punta	¢50.09	¢2838.16
Valle	¢40.72	¢2838.16
Nocturno	¢34.61	¢0

Tabla 5.2: Costo mensual de compra de energía al ICE

Horario	Energía Mensual (kWh)	Costo mensual
Punta	89,245.52	¢4,470,308.10
Valle	170,730.56	¢6,952,148.40
Nocturno	124,167.68	¢4,297,443.40
Total en colones		¢15,719,899.90
Total en dólares		\$30,291.16

Tabla 5.3: Costo mensual de compra de potencia al ICE

Horario	Potencia Mensual (kW)	Costo mensual
Punta	2,568	¢7,288,394.88
Valle	2,101	¢5,962,974.16
Nocturno	0	¢0
Total en colones		¢13,251,369.04
Total en dólares		\$25,534.47

5.3. Ingresos mensuales

Para establecer el monto de ingresos percibidos por JASEC en el circuito Parque Industrial, se considera solo la venta del servicio eléctrico a los clientes en el circuito para el mes de diciembre del 2023. En este caso, la información necesaria se extrajo de la hoja de cálculo suministrada por el departamento de cobro, donde se tiene el total de cobro por cliente del circuito, por lo que al sumar cada uno de los aportes mensuales en colones del circuito se tiene que los ingresos totales ascienden a los ¢36,704,805.06; esto resulta en un margen de operación, el cual se puede observar en la tabla 5.4.

Tabla 5.4: Margen de operación de JASEC sin DER integrado

Concepto	Monto mensual	Monto mensual
Ingresos	¢36,704,805.06	\$70,727.62
Costos	¢28,971,268.94	\$55,825.63
Margen	¢7,733,536.12	\$14,901.99

5.4. Tarifas de generación distribuida

Según lo establecido por ARESEP, desde el 1 de octubre del 2023 se tienen tarifas establecidas para conceptos de instalación, uso y aprovechamiento de recursos energéticos distribuidos. A continuación, se detalla cada una de las cuatro tarifas asociadas.

5.4.1. Tarifa de interconexión

Para la determinación del monto establecido por JASEC, para esta tarifa se deben considerar cuatro aspectos: Costo de solicitud, costo por estudio de ingeniería e inspección, por verificación de inspección final y por puesta en marcha del sistema. Según información de JASEC, esta tarifa tiene un monto de ¢283,029.00. Para el caso del presente estudio, esta tarifa no se considera dentro de los cálculos, esto debido a que el cobro se realiza una sola vez antes de que el sistema entre en funcionamiento.

5.4.2. Tarifa T-DER

Esta tarifa se asocia directamente con la capacidad instalada del sistema de generación distribuida del cliente, ya que por cada kW instalado JASEC realiza un cobro de ¢146.00.

5.4.3. Tarifa de acceso

La tarifa de acceso es aplicada para el consumo natural respectivo para cada cliente, en este caso se entiende como consumo natural a la suma energía consumida y generada, menos la energía inyectada a la red, de este modo la empresa distribuidora JASEC cobra ¢24.73 por kWh.

5.4.4. Tarifa por compra y venta de excedentes

Dependiendo del horario tomado en cuenta para venta y compra de excedentes, existen tres montos asociados para los momentos de punta, valle y nocturno, los cuales se pueden ver desglosados en la tabla 5.5, así como los montos de las otras tarifas por considerar.

Tabla 5.5: Tarifas para cobro de recursos energéticos distribuidos

Concepto	Monto
T-DER (Por kW)	¢146.00
Acceso (Por kWh)	¢24.79
Compra/Venta Punta (Por kWh)	¢69.24
Compra/Venta Valle (Por kWh)	¢50.87
Compra/Venta Nocturno (Por kWh)	¢33.67

5.5. Efectos de integración de DER

Al entrar en funcionamiento diferentes cantidades de DER a lo largo del circuito de distribución, el comportamiento de los flujos de potencia asociados a cada escenario de integración afecta directamente la demanda de potencia y energía del circuito; por este motivo se alteran los costos e ingresos de operación de la empresa distribuidora. Para generar una base de cálculo para el estudio, se establece el impacto que

se da en el circuito solo al considerar un panel con 3kW; según el perfil de irradiancia para un panel solar en Cartago se tiene que por día se generan 26.04 kWh, lo cual resulta en una generación mensual promedio de 781.20 kWh. Es importante también determinar el valor promedio de energía para los clientes, ya que es un dato necesario para algunos cálculos; en el caso del circuito Parque Industrial, el valor de consumo de energía promedio es 213.36 kWh.

5.5.1. Efecto en costos

Cuando el panel solar entra en funcionamiento, JASEC presenta una reducción de costos asociados a la disminución de energía que debe ser comprada al ICE, dado que por panel se generan 781.20 kWh. Si se realiza un estudio del comportamiento del perfil de irradiancia del panel solar en Cartago, se puede notar que el 70 % de energía se produce en el periodo valle y el 30 % en el periodo punta; de este modo se puede determinar el monto asociado a la reducción del costo de energía en el circuito (ver tabla 5.6).

Tabla 5.6: Reducción en costo mensual por concepto de compra de energía por panel

Periodo	Energía mensual (kWh)	Costo (kWh)	Costo mensual
Punta	237.71	¢50.09	¢11,906.89
Valle	543.49	¢40.72	¢22,130.91
Nocturno	0.00	¢34.61	¢0.00
Total colones			¢34,037.81
Total dólares			\$65.59

Para el caso de estimación de reducción de costos asociados al concepto de potencia, se debe entender que el cálculo de la potencia consumida, según los diferentes escenarios de integración, varía para cada cliente y por periodo durante el día, por lo que resulta complejo estimar un valor de potencia para la integración de paneles en el circuito, por el comportamiento variable y difícilmente predecible, no se toma en cuenta para el cálculo de margen de operación con integración de DER.

5.5.2. Efecto por tarifas de generación distribuida

Relacionado con la cantidad de energía consumida y producida por abonado, se establece que en promedio el consumo mensual de un cliente del circuito ronda los 220.00 kWh; esto significa que esta cantidad de energía es suministrada por el panel solar y existe un excedente de casi 561.2 kWh comprado por JASEC. Si se realiza un análisis del documento con la información del departamento de cobro, se tiene un monto de ¢21,208.00 o \$40.87 que no se compran al ICE.

Al considerar las diferentes tarifas para el caso de recursos energéticos distribuidos, se puede estimar el impacto que tiene la integración de un panel solar para un cliente en el circuito (ver tabla 5.7).

Según lo expuesto en la tabla 5.7, se debe recalcar que la integración de un panel solar resulta en un beneficio sustancial para el cliente que lo instala, no así para la empresa distribuidora, ya que debe desembolsar una cantidad de dinero debido el rubro de compra de excedentes y, además, se debe considerar una pérdida por no venta de energía, aunque se presente una reducción en el costo por compras al ICE.

Tabla 5.7: Impacto por panel para un cliente promedio del circuito Parque Industrial

Concepto	Variable	Tarifa	Monto
No venta	220.00 kWh	N/A	- C\$21,208.00
Acceso	220.00 kWh	C\$24.79	C\$5453.80
T-DER	3 kW	C\$146.00	C\$438.00
Compra/Venta Punta	168.36 kWh	C\$69.24	- C\$11,657.25
Compra/Venta Valle	392.84 kWh	C\$50.87	- C\$19,983.77
Compra/Venta Nocturno	0.00	C\$33.67	- C\$0.00
Total colonos			-C\$46,957.22
Total dólares			-\$90.48

5.6. Comportamiento del margen de operación

Al conocer el monto asociado al efecto sobre los ingresos y costos de operación por la integración a la red de un panel solar de 3 kW que produce 781.20 kWh, se puede cuantificar el comportamiento mensual del margen de operación de la empresa JASEC para el circuito Parque Industrial, donde, dependiendo de la cantidad de paneles integrados al sistema, para los diferentes escenarios de estudios de capacidad de penetración, se genera un cambio significativo en la cantidad de dinero que se recibe de los abonados y los costos de compra de energía.

En la tabla 5.8, se puede observar el cambio en el margen de operación de JASEC para el circuito, donde después de un escenario de integración de un 20 % de DER en la red, se presenta una fuerte pérdida en los ingresos percibidos por brindar el servicio eléctrico, esto debido a que la red se alimenta por grandes cantidades de energía inyectada por los recursos energéticos en el sistema. Además, uno de los aspectos más importantes que afectan los ingresos es el hecho de que la empresa distribuidora debe pagar por la compra y venta de energía a los abonados. En el caso de los costos, es importante notar cómo en el escenario de 20 % de integración se presenta una reducción total de los montos asociados a la compra de energía al ICE; esto se debe a que, después de este escenario, los flujos de potencia se invierten y toda la red del circuito Parque Industrial se alimenta solo con lo que se genera de los paneles solares integrados.

Tabla 5.8: Efectos de integración de DER en el circuito Parque Industrial

Escenario	DER (kW)	Ingresos	Costos	Margen de operación
0 %	0	\$70,858.70	\$55,929.09	\$14,929.61
10 %	1403	\$28,542.67	\$25,255.54	\$3,287.13
20 %	2513	-\$4,936.15	\$987.79	-\$5,923.95
30 %	3759	-\$42,516.89	\$0	-\$42,516.89
40 %	4956	-\$78,619.73	\$0	-\$78,619.73
50 %	5962	-\$108,961.80	\$0	-\$108,961.80
60 %	6950	-\$138,760.97	\$0	-\$138,760.97
70 %	7866	-\$166,388.53	\$0	-\$166,388.53
80 %	8756	-\$193,231.92	\$0	-\$193,231.92
90 %	9643	-\$219,984.81	\$0	-\$219,984.81
100 %	10526	-\$246,617.07	\$0	-\$246,617.07

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Para el primer objetivo específico, se logró desarrollar de forma exitosa el modelo en etap[®] del circuito Parque Industrial; con la información suministrada por la empresa distribuidora JASEC, la exactitud y validez del modelo queda sujeta a la precisión y calidad de la información del Sistema de Información Georreferenciada (GIS). Dada la falta de información referente a algunos elementos, como transformadores de cargas medidas en media tensión y líneas subterráneas, que componen el circuito, se pueden presentar diferencias con respecto a un caso más realista de simulación.

Se evidenció la utilidad de los módulos de flujo de potencia y cortocircuito, para poder llevar a cabo estudios de capacidad de penetración de recursos energéticos distribuidos según los criterios establecidos por ARESEP en la metodología de análisis, dado que los valores de mediciones en las diferentes variables por considerar en los estudios resultaron útiles para generar los reportes de capacidad de penetración en los estudios de pequeña y gran escala.

Se observó que la herramienta de simulación etap[®], aunque permite desarrollar los estudios de capacidad de penetración de forma correcta, necesita de una alta inversión de tiempo para realizar la configuración manual de integración de recursos energéticos y generar los resultados de capacidad, ya que se realizó un tratamiento de información con otros programas como Python y Excel, para extraer datos desde el GIS. Además, se nota una limitante al momento de realizar el estudio de gran escala, ya que es inviable realizar estudios de capacidad para cada uno de todos los nodos del circuito, esto debido a la naturaleza manual de integración de elementos y configuración de escenarios.

Para el segundo objetivo específico, se consiguió analizar los criterios para la capacidad de penetración en el escenario de pequeña escala donde se observó que en todos los casos el criterio de incumplimiento fue el aumento de tensión, hasta alcanzar la sobrecarga de transformadores, con este análisis se pudo generar una recopilación de capacidad de alojamiento de DER según capacidad del transformador al que se conecta cada abonado del circuito.

Para el tercer objetivo específico, se alcanzó a generar el resultado del estudio de capacidad de gran escala con el modelo del circuito Parque industrial, donde se evidenció que, en gran cantidad de nodos trifásicos el criterio de fallo fue el de sobrecarga de conductores, para el caso de nodos en la región del Parque Industrial de Inversiones Zeta (a excepción del nodo más lejano de esta región); para nodos más alejados de la subestación Tejar se observó que se presentó un cambio con respecto al criterio de incumplimiento, ya que el fallo se dio por efectos de aumento de corrientes de falla y para el nodo más lejano del circuito, en la región de Zona franca La Lima, el criterio de incumplimiento fue el de aumento de tensión.

Se obtuvo un mapa interactivo, con la información de capacidad de penetración de DER para el circuito Parque Industrial, el cual cumple con lo establecido por la metodología de ARESEP para la presentación de resultados para cada una de las empresas distribuidoras del país.

Para el cuarto objetivo específico, se desarrolló un análisis de los efectos económicos asociados a la integración de diferentes cantidades de GD al circuito Parque Industrial, donde se evidenció que después de un escenario de integración del 20 %, el margen de operación de la empresa distribuidora se vuelve negativo, lo que demuestra que con las consideraciones tomadas en el capítulo 5, la empresa experimenta pérdidas que se incrementan considerablemente con la cantidad de DER integrada en cada escenario.

6.2. Recomendaciones

Durante el desarrollo del modelo del circuito en etap[®], se recalca la gran cantidad de tiempo utilizado para exportar la información de forma manual desde los archivos compartidos por el departamento GIS hacia el modelo; por este motivo se recomienda, para el primer objetivo específico, explorar algún método más automatizado de exportación de información desde el sistema de información georreferenciada al software de simulación, ya que, según la cantidad de elementos alojados en el circuito, se puede complicar el proceso de modelado. Además, al realizar una exportación manual de información, se pueden presentar errores humanos en la configuración de componentes de la red, lo que volvería al modelo impreciso y poco fiable.

Se recomienda realizar una revisión de la información alojada en los archivos de GIS para el circuito, ya que datos como transformadores de cargas medidas en media tensión no se encuentran actualizados, además de una actualización, pues en el caso de la línea de distribución de Zona franca La Lima no está debidamente georreferenciada, lo cual es indispensable para generar un modelo exacto del circuito.

Con respecto a la codificación para la clasificación de elementos alojados en el circuito, se recomienda que se genere una metodología lógica de asignación de identificación general para todos los circuitos, porque se puede generar alguna confusión al momento de actualizar los modelos en el software de simulación. Además, esto permite que se analice la información de una forma más eficiente, ya que se logra relacionar fácilmente el modelo GIS con el modelo eléctrico de simulación.

Para los objetivos específicos, segundo y tercero, se recomienda idear una metodología o identificar alguna nueva herramienta de simulación, que permita desarrollar estudios de pequeña escala y gran escala de forma automatizada, para reducir los tiempos de generación de resultados, además de que permita realizar pruebas en todos los nodos de media tensión de una forma rápida y, así, obtener resultados más precisos para nodos intermedios.

Actualmente, la empresa distribuidora JASEC utiliza mapas en formato de imagen para presentar los resultados de capacidad de penetración para los circuitos estudiados; por este motivo, se recomienda realizar mapas interactivos, los cuales permiten a los usuarios interesados observar los resultados de forma lógica y simple.

Bibliografía

- [1] Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, “Ley 10086: Promoción y regulación de recursos energéticos distribuidos a partir de fuentes renovables,” 2022. [Online]. Disponible en:https://pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=96064&nValor3=128505&strTipM=TC. [Accedido: May. 1, 2024].
- [2] JASEC, “Historia de jasec,” 2024. [Online]. Disponible en:<https://www.jasec.go.cr/index.php/historia-de-jasec/>. [Accedido: Abr. 25, 2024].
- [3] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), “¿qué son los objetivos de desarrollo sostenible?,” 2024. [Online]. Disponible en:<https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>. [Accedido: Abr. 25, 2024].
- [4] M. de Ambiente energía y Telecomunicaciones, “Plan Nacional de Energía 2015-2030,” 2015. [Online]. Disponible en:https://www.cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2018/08/VII_Plan_Nacional_de_Energia_2015-2030.pdf. [Accedido: May. 17, 2024].
- [5] Ministerio de Ambiente energía y Telecomunicaciones, “Plan nacional de descarbonización,” 2019. [Online]. Disponible en:<https://cambioclimatico.minae.go.cr/wp-content/uploads/2019/11/PLAN-NACIONAL-DESCARBONIZACION.pdf>. [Accedido: May. 17, 2024].
- [6] T.Guzmán Hernández, F.Araya Rodríguez, G.Castro Badilla y J.Obando Ulloa, “Uso de la energía solar en sistemas de producción agropecuaria: producción más limpia y eficiencia energética,” *Tecnología en Marcha*, vol. 29, pp. 46-56, Dic.2016, doi:10.18845/tm.v29i8.2984.
- [7] L.V.Clementi y G.P.Jacinto, “Energía eólica distribuida: oportunidades y desafíos en argentina,” *Letras Verdes, Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, no. 29, pp. 48-64, Mar.2021, doi:10.17141/letrasverdes.29.2021.4590.
- [8] H. R. Farías Yáñez, “La generación distribuida en michoacán,” Tesis, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán. 2019.
- [9] R. E. Lorren Delgado, “Estudio de impactos de la generación distribuida renovable en redes eléctricas,” Tesis, Universidad de Piura, Piura, Piura. 2021.
- [10] J. P. Morales Hernández, “Estudio técnico financiero de los resultados de integrar generación distribuida a la red eléctrica de jasec mediante modelado y simulación en etap,” Trabajo Final de Graduación, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Cartago. 2023.
- [11] E. D. Brenes Fallas, “Modelado y simulación de una red de distribución en media tensión de Cartago para JASEC, de acuerdo con el cumplimiento de la Ley 10086,” Trabajo Final de Graduación, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Cartago. 2023.
- [12] D. A. Contreras Cerón, N. E. Aguirre Carranza y C. A. Cajamarca Montes, “Análisis de un sistema fotovoltaico para el ahorro de energía para una empresa procesadora de alimentos en el barrio las ferias en bogotá,” Proyecto de Grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. 2017.

- [13] K. J. Sáenz González, “Estudio del comportamiento de una red de distribución monofásica en 34,5 kv para el análisis de la penetración de recursos distribuidos de generación solar en la red eléctrica de jasec, mediante la aplicación de la ley 10086,” Trabajo Final de Graduación, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Cartago. 2023.
- [14] F. Lipa Yapo y C. E. Zevallos Sicus, “Propuesta de norma reglamentaria para la generación distribuida para autoconsumo en el Perú,” Tesis, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Cusco. 2023.
- [15] R. O. Raodríguez Velásquez, G. A. Osma Pinto, J. E. Solano Martínez, R. Roche y D. Hissel, “Marco de referencia para la resiliencia de las redes eléctricas de BT con inyección de potencia fotovoltaica,” *Tecnura*, vol. 25, no. 70, pp. 71-89, 2021.
- [16] U. A. López López, A. A. Tagle Pérez, R. I. Ramírez Castillejo, G. Ramírez Castillejo y F. J. Ayala Bernal, “Beneficios de la utilización de las celdas fotovoltaicas en las empresas familiares de producción y venta de aguacate para exportación,” *IPSUMTEC*, vol. 5, no. 4, pp. 79-85, jul.2022.
- [17] ARESEP, “Procedimiento de capacidad de penetración de DER por circuito de distribución que se integran con las redes de distribución del SEN,” 2023. [Online]. Disponible en: https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/751788a2-e90b-4e14-aea1-15678e9062ea/RE-0095-JD-2023_+Procedimiento+Capacidad+de+Penetraci%C3%B3n+DER+por+circuito+de+distribuci%C3%B3n.pdf?MOD=AJPERES&CVID=oKHexAM. [Accedido: 20 de junio de 2024].

Apéndice A

Apéndice A: Información para un panel solar

Tabla A.1: Energía y potencia de un panel solar en un día para Cartago, Costa Rica

Hora	Potencia (kW)	Energía (kWh)
06:45:00	0,00	0,0863
07:00:00	0,69	0,1725
07:15:00	0,69	0,1725
07:30:00	0,69	0,1725
07:45:00	0,69	0,3263
08:00:00	1,92	0,4800
08:15:00	1,92	0,4800
08:30:00	1,92	0,4800
08:45:00	1,92	0,5550
09:00:00	2,52	0,6300
09:15:00	2,52	0,6300
09:30:00	2,52	0,6300
09:45:00	2,52	0,6563
10:00:00	2,73	0,6825
10:15:00	2,73	0,6825
10:30:00	2,73	0,6825
10:45:00	2,73	0,7050
11:00:00	2,91	0,7275
11:15:00	2,91	0,7275
11:30:00	2,91	0,7275
11:45:00	2,91	0,7200
12:00:00	2,85	0,7125
12:15:00	2,85	0,7125
12:30:00	2,85	0,7125
12:45:00	2,85	0,7050
13:00:00	2,79	0,6975
13:15:00	2,79	0,6975
13:30:00	2,79	0,6975
13:45:00	2,79	0,7050
14:00:00	2,85	0,7125
14:15:00	2,85	0,7125
14:30:00	2,85	0,7125
14:45:00	2,85	0,6900
15:00:00	2,67	0,6675
15:15:00	2,67	0,6675
15:30:00	2,67	0,6675
15:45:00	2,67	0,6225
16:00:00	2,31	0,5775
16:15:00	2,31	0,5775
16:30:00	2,31	0,5775
16:45:00	2,31	0,4800
17:00:00	1,53	0,3825
17:15:00	1,53	0,3825
17:30:00	1,53	0,3825
17:45:00	1,53	0,2250
18:00:00	0,27	0,0675
18:15:00	0,27	0,0675
18:30:00	0,27	0,0675
18:45:00	0,27	0,0338
Total	-	26,040