

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Electricidad y computación

Gestión de demanda de sistema de distribución utilizando software de
optimización

ING-2733

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Eléctrico

Presentado por:

Walther Patricio Lopez Zhunio

Helmer Cristhian Mera Moran

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado con mucho esmero a nuestros padres, por todo el sacrificio que han realizado para brindarnos los medios necesarios para completar nuestra carrera. Su apoyo incondicional ha sido fundamental en nuestro crecimiento académico y personal.

Agradecimientos

Nuestros más sinceros agradecimientos a nuestros tutores, quienes con su guía, paciencia y conocimientos nos han acompañado a lo largo de este camino, ayudándonos a superar los desafíos y a alcanzar nuestras metas.

Declaración Expresa

Nosotros Walther Patricio Lopez Zhunio y Helmer Cristhian Mera Moran acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al los autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de ~~plazo indefinido~~ para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 4 de octubre del 2024.



Walther Patricio Lopez
Zhunio



Helmer Cristhian Mera
Moran

Evaluadores

Mgtr. Patricia Isabel Pasmay Bohórquez

Profesor de Materia

Msc. Alvarado Moreno Otto Ismael

Tutor de proyecto

Resumen

El proyecto "Gestión de demanda de sistema de distribución utilizando software de optimización" tiene como objetivo implementar un sistema eficiente de gestión de la demanda energética residencial, con el fin de reducir costos y optimizar el uso de recursos energéticos. Se justifica la necesidad de este estudio debido al creciente consumo energético y la importancia de integrar fuentes de generación distribuida. Para el desarrollo del proyecto, se utilizaron herramientas de software de optimización, junto con técnicas de análisis de demanda y normativas eléctricas vigentes. Se realizaron simulaciones y análisis de datos para evaluar el comportamiento del sistema. Los resultados obtenidos demostraron que la implementación del sistema propuesto permitió una reducción significativa en las pérdidas energéticas y un mejor manejo de la eficiencia energética. Además, se evidenció que la priorización de fuentes de generación distribuida contribuyó a un manejo más sostenible de la energía. En conclusión, la gestión adecuada de la demanda energética, apoyada por software de optimización, es fundamental para lograr un sistema de distribución más eficiente y económico.

Palabras Clave: Gestión de demanda, optimización, energía, generación distribuida, eficiencia.

Abstract

The project "Management of demand in the distribution system using optimization software" aims to implement an efficient system for managing residential energy demand in order to reduce costs and optimize the use of energy resources. The need for this study is justified by the increasing energy consumption and the importance of integrating distributed generation sources. For the development of the project, optimization software tools were utilized, along with demand analysis techniques and current electrical regulations. Simulations and data analyses were conducted to evaluate the system's behavior. The results obtained demonstrated that the implementation of the proposed system allowed for a significant reduction in energy losses and an improvement in energy use efficiency. Additionally, prioritizing distributed generation sources contributed to a more sustainable energy management approach. In conclusion, the proper management of energy demand, supported by optimization software, is essential for achieving a more efficient and economical distribution system

Keywords: Demand management, optimization, energy, distributed generation, efficiency.

Índice general

Resumen.....	I
<i>Abstract</i>	II
Índice	III
Abreviaturas	VI
Simbología	VII
Índice de figuras.....	VIII
Índice de tablas.....	IX
1. Capítulo 1	1
1.1. Introducción	2
1.2. Descripción del problema	2
1.3. Justificación del problema.....	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. ‘Objetivos generales	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Marco teórico	3
1.5.1. Principios generales para las instalaciones eléctricas residenciales según el NEC	3
1.5.2. Estudio de demanda y factor de demanda.....	4
1.5.3. Clasificación de la vivienda y números de circuitos según el área de construcción	4
1.5.4. Factores de demanda según el tipo de carga y según número de cargas especiales	4
1.5.5. Consideraciones para los circuitos.....	5
1.5.6. Limitaciones de los circuitos.....	5
1.5.7. Consideraciones de dimensionamiento de conductor por tipo de circuito.....	6
1.5.8. Calibre de conductor de puesta a tierra.....	6

1.5.9.	Sistema eléctrico de distribución.....	7
1.5.10.	Definición e impacto de la generación distribuida fuera de la red	7
1.5.11.	Ubicación y dimensionamiento optimo de generación distribuida.....	7
1.5.12.	Antecedentes de la energía solar fotovoltaica	8
1.5.13.	Modelos se sistema fotovoltaico con almacenamiento	8
1.5.14.	Análisis de factores que contribuyen en las pérdidas de energía residenciales.....	9
2.	Capítulo 2	10
2.2.	Metodología	12
2.2.1.	Diagrama de flujo de procesos.....	12
2.2.2.	Recolección de datos de consumo de demanda de vivienda – caso de estudio	14
2.2.3.	Pliego tarifario del consumo eléctrico en KWh	15
2.2.4.	Análisis de ecuaciones para el caso de estudio - Residencia con generación distribuida y almacenamiento.....	16
2.2.5.	Desarrollo de modelo de optimización en AMPL	19
2.2.6.	Análisis de los diferentes casos de estudio	19
2.2.7.	Producción energética y radiación solar promedio.....	20
2.2.8.	Especificaciones técnicas, éticas y legales del proyecto	21
3.	Capítulo 3	23
3.1.	Determinación de potencia de generación distribuida	24
3.2.	Resultados de datos de potencia de generación distribuida	24
3.3.	Resultados del costo por consumo eléctrico por hora para los diferentes casos	25
3.4.	Resumen de datos para ingresar en el código AMPL.....	28
3.5.	Resultados para diferentes casos mostrados	28
3.5.1.	Caso básico	29
3.5.2.	Caso con Generación distribuida sin almacenamiento de energía	30
3.5.3.	Caso de estudio con generación distribuida y almacenamiento de energía	32
3.6.	Comparación de costos de energía eléctrica de los diferentes casos analizados.....	35
3.7.	Curva de resultados de costos anuales al analizar diferentes potencias de generación	

distribuida para casos analizados	35
3.8. Costo de proyecto	37
4. Capítulo 4	39
4.1. Conclusiones y recomendaciones	40
4.1.1. Conclusiones	40
4.1.2. Recomendaciones	40
5. Referencias	42
6. Anexos.....	43
Plano residencial para caso de estudio.....	43
Código AMPL de los diferentes casos.....	44
Caso 1.....	44
Caso 2.....	47
Caso 3.....	50

Abreviaturas

EAE	Energía almacenada en las baterías
eAE	Estado de las baterías “1” o “0”
KWh	Kilovatio-hora
PAEi	Potencia inyectada al sistema por las baterías
PAEe	Potencia extraída de la generación distribuida por las baterías
PD	Potencia Demandada
PGD	Potencia de generación distribuida

Simbología

- **Parámetros**

C_{OS}_T = Costo de compra de la energía en un intervalo t [$\frac{R\$}{KWh}$]

E^{AE} = Capacidad máxima del almacenamiento de energía [KWh]

E^{AE0} = Energía de almacenamiento inicial [KWh]

T : Conjunto de intervalo de tiempo

P_T^D = Demanda de potencia activa de la residencia en un tiempo t [KW]

P^{AE} = Potencia máxima inyectada o extraída del almacenamiento [KW]

α = eficiencia del almacenador de energía

∂ = intervalo de tiempo en horas [h]

- **Variables**

E_T^{AE} = Energía almacenada en un intervalo t [KW]

e_T^{AE} = Estado de operación del almacenador en un intervalo t , (1 inyecta, 0 extrae)

P_T^S = Potencia activa suministrada por la red de distribución en un intervalo t

P_T^V = Potencia activa vendida o entregada a la red de distribución

en un intervalo t

P_T^{AEi} = Potencia activa inyectada por el almacenador en un intervalo t [KW]

P_T^{AEe} = Potencia activa extraída por el almacenador en un intervalo t [KW]

Índice de figuras

Figura 1.1: Modelo realizado en software de sistema fotovoltaico con almacenamiento por medio de baterías	8
Figura 2.1: Diagrama de flujo para recopilar datos de potencia demandada	12
Figura 2.2: Diagrama de flujo para recopilar datos de potencia distribuida	13
Figura 2.3: Sistema de caso de estudio de gestión de energía con generación distribuida y almacenamiento de energía	17
Figura 2.4: Pasos a seguir para desarrollar el código en AMPL	19
Figura 2.5: Caso básico de gestión de demanda residencial	19
Figura 2.6: Gestión de energía residencial con generación distribuida.....	20
Figura 2.7: Generación de energía de los paneles fotovoltaicos en un lapso de un día solar ..	20
Figura 3.1: Gráfico de producción de energía fotovoltaica en horas luz	24
Figura 3.2: Gráfico de demanda diaria de la residencia para el caso básico	30
Figura 3.3: Gráfico de demanda diaria de la residencia para el caso con generación distribuida sin almacenamiento.....	32
Figura 3.4: Gráfico de demanda diaria de la residencia para el caso de estudio.....	34
Figura 3.5: Gráfico de potencia máxima de GD versus costo anual por consumo eléctrico ...	37
Figura 6.1: Plano residencial detallado los circuitos	43

Índice de tablas

Tabla 1.1: Clasificación de la vivienda y números de circuitos.....	4
Tabla 1.2.: <i>Factor de demanda de cada circuito en función del tipo de vivienda</i>	4
Tabla 1.3: <i>Datos de potencias mínimas de equipos especiales</i>	5
Tabla 1.4: <i>Factor de demanda para circuitos en función de la potencia la carga especial</i>	5
Tabla 1.5: <i>Calibre de conductor para puesta a tierra en función de la capacidad del equipo de protección</i>	6
Tabla 2.1: Detalle de carga del tablero de distribución de caso de estudio.....	14
Tabla 2.2: Distribución de carga durante un periodo de 24 horas.....	15
Tabla 2.3: Tarifas del servicio de energía eléctrica para el año 2024.....	16
Tabla 2.4: Radiación solar promedio por día y por mes	21
Tabla 3.1: Datos de demanda horaria, de generación distribuida (solar) en un periodo de 24 horas.....	25
Tabla 3.2: Datos de potencia suministrados diarios y mensuales para cada caso	26
Tabla 3.3: Tabla de pliego tarifario con total de potencia y costo.....	26
Tabla 3.4: Calculo de costo del KWh para el caso 1	26
Tabla 3.5: Calculo de costo del KWh para el caso 2	27
Tabla 3.6: Calculo de costo del KWh para el caso 3.....	27
Tabla 3.7: Resumen de datos necesarios de cada caso para el código.....	28
Tabla 3.8: Resultados de optimización para el caso básico	29
Tabla 3.9: Resultados para el caso con generación distribuida	31
Tabla 3.10: Resultados de optimización para el caso de estudio con generación distribuida almacenamiento de energía	33
Tabla 3.11: Comparación de costos anuales de los diferentes casos analizados.....	35
Tabla 3.12: Datos de potencia fotovoltaica para distintas horas luz.....	35
Tabla 3.13: Resultados de costos anuales para caso 2 y 3	36
Tabla 3.14: Precio de licencia de software.....	38
Tabla 3.15: Valores de diferentes ítems de estudio	38

1. Capítulo 1

1.1. Introducción

La creciente demanda de energía en el país y la incorporación de generación distribuida en los sistemas de distribución eléctrica, plantean nuevos desafíos para la gestión eficiente de energía, para que no causen estragos en el sistema ya establecido, sino todo lo contrario, que ayude a mejorar la matriz energética del país. La falta de energía a nivel nacional afecta tanto a industrias, negocios y a los hogares, que depende de su día a día de la energía eléctrica para realizar diferentes actividades en el hogar. Por ello la gestión de energía eléctrica en una residencia considerando recursos energéticos distribuidos, se ha vuelto una prioridad con el fin de mantener siempre funcionando el hogar para cubrir las necesidades diarias. Este trabajo está orientado en el análisis y optimización de la energía a nivel residencial mediante el uso de software de optimización, con el objetivo de reducir costos por consumo y las pérdidas que se puedan generar en el sistema por una mala distribución, además administrar de manera eficiente la energía proveniente de fuentes de generación distribuida y almacenarlas para ser usadas durante la falta de generación. El estudio se basa en un caso práctico en el que se cuenta con datos detallados tanto de la demanda de energía en un periodo de 24 horas y de la potencia generada a través de fuentes distribuidas, lo cual permite una visión integral de las condiciones actuales del sistema. A través del software de optimización, se evaluarán distintos escenarios de gestión de la demanda eléctrica de una vivienda que permitan comparar los costos de facturación hasta llegar al caso de estudio el cual cuenta con almacenamiento de energía. Este enfoque no solo busca mejorar la eficiencia del sistema, sino también ofrecer un modelo de gestión que pueda ser replicable en otros sistemas eléctrico a nivel residencial con características similares. Así el estudio contribuye a gestionar la demanda de energía a nivel residencial con generación distribuida.

1.2. Descripción del problema

La necesidad de gestionar de manera eficiente la energía en una residencia, considerando tanto la energía generada a partir de fuentes de generación distribuida y la suministrada por la red de distribución, es crucial para atender la demanda energética única de la vivienda, especialmente en un contexto donde el consumo energético está en aumento y se presentan desafíos en la disponibilidad y sostenibilidad de los recursos energéticos. La falta de una adecuada administración de estas fuentes puede resultar en costos elevados y en un uso ineficiente de la energía, lo que subraya la importancia de implementar un sistema que optimice el flujo energético y minimice las pérdidas.

1.3. Justificación del problema

El proyecto titulado " Gestión de energía eléctrica en una residencia considerando recursos energéticos distribuidos utilizando software de optimización " tiene como objetivo gestionar la energía de manera eficiente en una residencia que es suministrada por la red de distribución y por generación distribuida, ya que un mal manejo de la energía puede generar costos elevados en la planilla y una pérdida de energía al no ser gestionada de manera correcta.

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivos generales*

Implementar un sistema de gestión y optimización de la demanda eléctrica en el sistema de distribución, utilizando software de optimización para mejorar la eficiencia energética residencial con recursos energéticos distribuidos.

1.4.2. *Objetivos específicos*

- Analizar los principales factores que contribuyen a las pérdidas de energía residenciales.
- Aplicar un software de optimización que permita gestionar eficientemente la demanda eléctrica residencial, con base en algoritmos que optimicen el flujo de energía, minimicen las pérdidas y prioricen la generación distribuida.
- Evaluar los resultados de la implementación del software mediante simulaciones, considerando escenarios de generación distribuida.
- Proponer estrategias de optimización que permitan reducir las pérdidas y mejore la eficiencia operativa del suministro eléctrico de generación distribuida.

1.5. Marco teórico

1.5.1. *Principios generales para las instalaciones eléctricas residenciales según el NEC*

Las instalaciones eléctricas residenciales deben garantizar la integridad de las personas y sus bienes ante cualquier riesgo que pueda suscitarse por el manejo de la electricidad, y regirse a estándares de calidad.

El diseño eléctrico está basado en estudios arquitectónicos y en las características físicas que posee la vivienda proyecta.

Los criterios técnicos y resultados de los cálculos a desarrollarse deben ser incluidos en los planos eléctricos según lo dictamina la norma IEC 60617 y detallarse en la memoria técnica descriptiva del proyecto.

Esta norma garantiza la seguridad en las instalaciones eléctricas. [1]

1.5.2. Estudio de demanda y factor de demanda

Para el correcto cálculo de diseño eléctrico a nivel residencial, se debe de considerar los siguientes parámetros: [1]

- **Sistema de iluminación:** Cada punto de iluminación se considera como una carga de 100 W.
- **sistema de tomacorrientes:** Cada punto de tomacorriente se considerar una carga de 100 W.
- **Sistemas de tomacorrientes especiales:** Son cargas especiales aquellas cuya potencia sobrepasan los 1.500 W. Para estos deben de considerarse la potencia de placa de cada equipo que entre en este grupo para el estudio.

1.5.3. Clasificación de la vivienda y números de circuitos según el área de construcción

Tabla 1.1: Clasificación de la vivienda y números de circuitos

Tipo	Área en m2	Mínimo número de circuitos	
		Iluminación	Tomacorrientes
Pequeña	$A < 80$	1	1
Mediana	$80 < A < 200$	2	2
Mediana grande	$201 < A < 300$	3	3
Grande	$301 < A < 400$	4	4
Especial	$A > 400$	1 por cada 100 m2	1 por cada 100

Nota: Fuente [1]

1.5.4. Factores de demanda según el tipo de carga y según número de cargas especiales

El factor de demanda (FD) que se considera para circuitos en función del tipo de vivienda (véase Tabla 1.1.) se especifica en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2.: Factor de demanda de cada circuito en función del tipo de vivienda

Tipo de vivienda	FD Iluminación	FD Tomacorriente
Pequeña-mediana	0,7	0,5
Mediana grande-grande	0,55	0,4
Especial	0,53	0,3

Nota: Fuente [1]

Para aquellas cargas especiales que no se cuentan con valores específicos, se puede considerar las siguientes potencias para el cálculo de la carga instalada. [1]

Tabla 1.3: Datos de potencias mínimas de equipos especiales

Equipo eléctrico	Potencia media Kw
Ducha eléctrica	3,5
Horno eléctrico	3
Cocina eléctrica	6
Calefón eléctrico	8
Aire acondicionado	2,5
Calentador eléctrico	3
Carga para vehículo eléctrico	7,5

La demanda de las cargas especiales se determina mediante el factor de demanda que depende de la cantidad de cargas especiales instaladas en el circuito. [1]

Tabla 1.4: Factor de demanda para circuitos en función de la potencia la carga especial

1 carga	2 o más cargas	2 o más cargas	2 o más cargas
	CE < 10 Kw	10 Kw < CE < 20 KW	CE > 20 KW
1	0,8	0,75	0,65

Nota: Fuente [1]

1.5.5. Consideraciones para los circuitos

- Los conductores usados deben soportar una corriente de 125% de la carga máxima determinada.
- Cada circuito debe tener conductor de tierra.
- Cada circuito debe tener su protección termomagnética.
- Cada circuito debe ser independiente entre plantas de la vivienda.

1.5.6. Limitaciones de los circuitos

Los circuitos de iluminación deben tener una carga máxima de 15 amperios y deben ser diseñado con máximo 15 puntos de iluminación.

Los circuitos de tomacorriente deben estar diseñados para soportar una carga máxima de 20 amperios por circuito y un número máximo de 10 tomas.

Los circuitos considerados especiales deben ser diseñados para soportar la carga nominal del equipo. [1]

1.5.7. Consideraciones de dimensionamiento de conductor por tipo de circuito

- **Circuito de iluminación:**

- El conductor neutro debe ser el mismo del de fase.
- El conductor de cobre aislado tipo THHN, calibre 14 AWG.

- **Circuito de tomacorriente generales:**

- Calibre del conductor neutro debe ser el mismo del conductor fase.
- El conductor de cobre aislado tipo THHN, calibre 12 AWG tanto para fase y neutro.
- Para el conductor neutro, viene dado en la Tabla 1.5.

- **Circuito de carga especiales:**

- El conductor de cobre tipo THHN, con un calibre mínimo 10 AWG por fase.
- El conductor de neutro se determina según la Tabla 1.5.

- **El alimentador del tablero de distribución:**

- El conductor de cobre aislado tipo THHN, con un calibre 6.
- En caso de existir varios tableros de distribución, el conductor de cada sub-alimentador debe de estar en función de la demanda de cada sub-tablero. Tablero.

1.5.8. Calibre de conductor de puesta a tierra

Tabla 1.5: Calibre de conductor para puesta a tierra en función de la capacidad del equipo de protección

Capacidad del dispositivo de protección	Tamaño nominal mm ² (AWG o Kcmil)	
	Conductor de cobre	conductor de aluminio
15	2,08 (14)	----
20	3,31 (12)	----
30	5,26 (10)	----
40	5,26 (10)	----
60	5,26 (10)	----
100	8,37 (8)	13,6 (6)
200	13,3 (6)	21,2 (4)
300	21,2 (4)	33,6 (2)
400	33,6 (2)	42,4 (1)

Nota: Fuente Tabla 250.122 del NEC

1.5.9. Sistema eléctrico de distribución

El sistema eléctrico de distribución es muy complejo y está conformado por transformadores, alimentadores y líneas, conectados mediante nodos. Las variaciones de tensiones que está sometido un nodo dependen mucho de la variación de la carga, es decir, que entran cargas a conectarse a la red y de mismo modo se desconectan. Esto es lo que comúnmente se le conoce como demanda de la red. [2]

Para analizar el estado del sistema, se debe tener en cuenta el tipo de carga que se encuentra conectado para interpretar los indicadores del sistema; estos indicadores nos darán una idea de las pérdidas de energía, violación de los perfiles de tensión, estabilidad de los voltajes, estados de las líneas respecto a cuanta carga están sometidos. Con estos datos se podrá estimar el estado operativo de la red. [2]

1.5.10. Definición e impacto de la generación distribuida fuera de la red

Siempre se ha buscado la mejora de las características operativas del sistema de distribución (SD), mejoras como reconfiguración de alimentadores, ubicación de bancos de capacitores y reguladores de voltaje y además la implementación en la red o fuera de la red de la generación distribuida, etc. La integración de generación distribuida fuera de la red (GD) ha tenido una gran acogida permitiendo llevar extensas investigaciones a nivel mundial. [2]

Según [3], la GD es una fuente de energía eléctrica renovable que se encuentra conectada directamente a la carga seleccionada.

Según la capacidad de generación, esta puede clasificarse como: micro, pequeña, mediana y grande generación.

Las fuentes de GD tienen cuatro formas de inyectar potencia a la red. El primer tipo solo inyecta potencia activa, el segundo inyecta potencia reactiva; el tercer tipo es la combinación de tipo 1 y 2, y el cuarto tipo permite la inyección de potencia activa por el generador y la inyección de potencia reactiva por capacitores. El caso más utilizado en la implementación de GD es del tipo 1, y se representa en el sistema como una carga negativa. [5]

1.5.11. Ubicación y dimensionamiento óptimo de generación distribuida

A continuación, se habla sobre los componentes principales que optimizan la ubicación y dimensionamiento de la GD. [2]

- **Método de optimización implementados para ubicar y dimensionar GD:** Para integrar la GD hay que tener en cuenta los escenarios, los cuales toman en cuenta las posibles ubicaciones, tamaño, tecnología y cantidad de unidades de GD, que puede ser

una unidad o múltiples unidades. Existen diversas técnicas y métodos, las cuales se mencionan a continuación:

- Método analítico
- Método numérico.
- Métodos heurísticos y metaheurísticos.
- Métodos híbridos

1.5.12. Antecedentes de la energía solar fotovoltaica

El uso de energía solar fotovoltaica (FV) en Ecuador, se encuentra en un constante crecimiento mediante el método de generación distribuida (GD).

Considerando además el aspecto económico, la incorporación de la energía solar FV también representa un aspecto positivo para el medio ambiente.

Los retos que representa la implementación de las energías renovables son, la variabilidad, puesto que la implementación depende de la ubicación geográfica y además de las condiciones meteorológicas. Esto implica que habrá horas, días o meses en que la producción podría ser efectiva o, todo lo contrario. Por ello es fundamental la incorporación de almacenamiento de energía. [6]

En resumen, el objetivo de la generación FV a nivel residencial, es cubrir la demanda eléctrica local, limitando así, la adquisición de energía eléctrica proveniente de la red de distribución.

1.5.13. Modelos de sistema fotovoltaico con almacenamiento

En la figura 1.1 se muestra los pasos a seguir y modelos individuales a ser incorporados por medio de variables de acople con el fin de dar a entender en su totalidad el comportamiento de un sistema FV con almacenamiento.

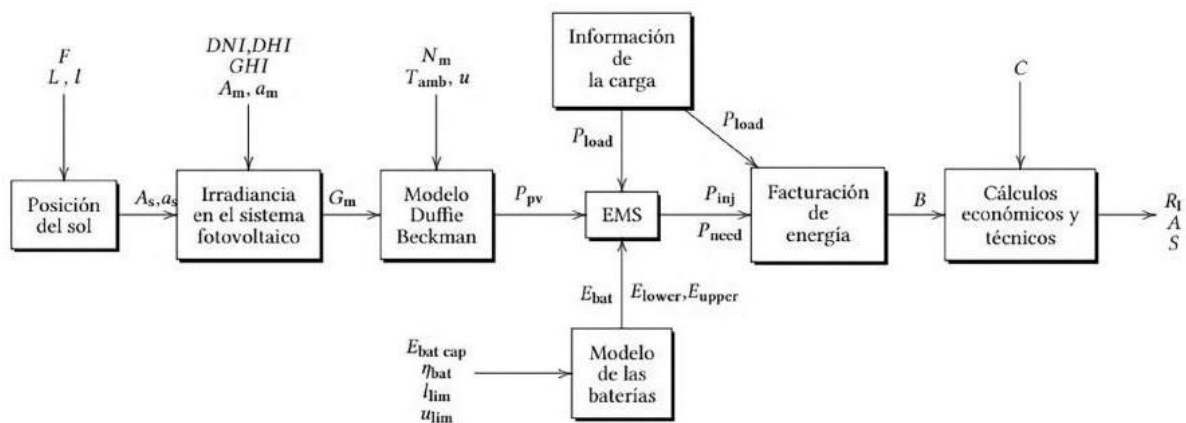


Figura 1.1: Modelo realizado en software de sistema fotovoltaico con almacenamiento por medio de baterías

Nota: Fuente [6]

1.5.14. Análisis de factores que contribuyen en las pérdidas de energía residenciales

Los principales factores que contribuyen a las pérdidas de energía en sistemas residenciales están ligadas a las malas instalaciones eléctricas, las cuales causan pérdidas de energía y pueden representar un riesgo a las personas y a los equipos conectados en el sistema. Por lo cual el diseño de las instalaciones eléctricas, deben ser realizadas por profesionales del área los cuales deben seguir ciertos criterios para la instalación eléctrica. (Véase apartado 1.5.1. a 1.5.6)

A continuación, se detallan los factores que pueden causar pérdida eléctrica a nivel residencial y sus posibles soluciones:

- **Conexiones internas en tuberías:** Para estos casos se debe realizar una inspección visual de las conexiones.
- **Puntos calientes en la conexión:** Para ellos se utiliza equipos avanzados como cámaras termográficas, que identifica los puntos calientes en la instalación.
- **Mal dimensionamiento de conductores:** Para ello se debe de revisar los planos eléctricos y verificar si las especificaciones cumplen con los reglamentos establecidos. Otra forma es medir la corriente que pasa por los conductores y verificar si está dentro de lo permisible de los conductores.
- **Mal dimensionamiento de los equipos de protección:** Verificar que los equipos estén bien dimensionados para la corriente de los equipos, verificar con las normas locales.
- **Contacto indirecto de una fase a tierra:** Usar un detector de fugas a tierra o un equipo de medición de aislamiento, y hacer la prueba de continuidad a tierra de los equipos y de la instalación.
- **Aparatos en mal estado:** Es importante verificar el estado de los equipos de la instalación, ya que pueden causar daños personales y generar un consumo elevado de energía.

2. Capítulo 2

2.2. Metodología

A continuación, se detalla las consideraciones y cálculos necesarios para llevar a cabo la solución del problema, siguiendo las mejores alternativas.

2.2.1. Diagrama de flujo de procesos

Para llevar a cabo el desarrollo del proyecto, se planteó dos diagramas de flujo de proceso, debido a que los datos de recolección tienen dos partes importantes, como son la recolección de dato de la potencia demandada y datos de la generación distribuida. A continuación, se muestran los diagramas de procesos.

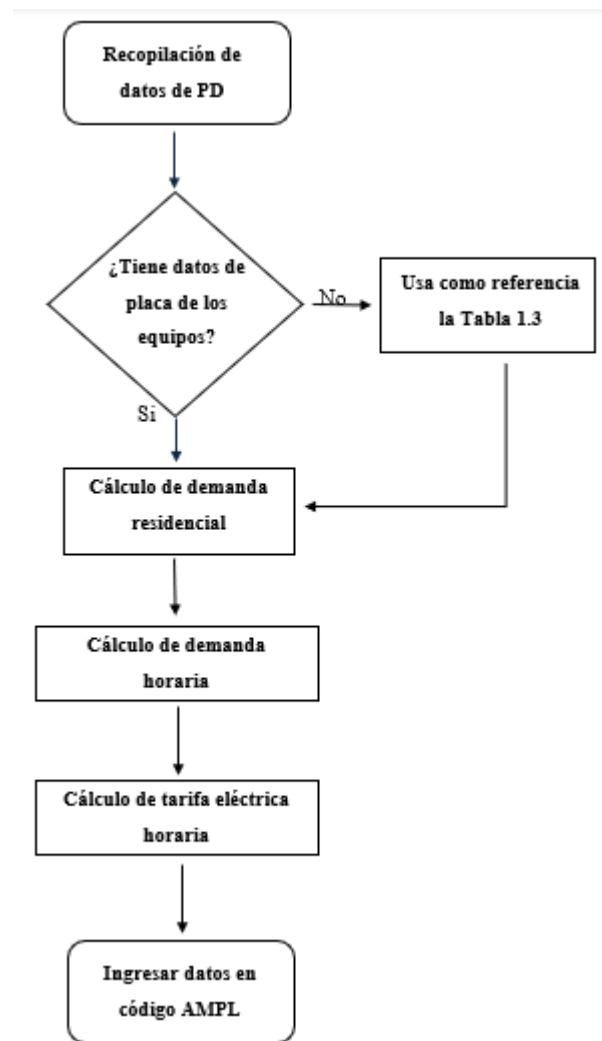


Figura 2.1: Diagrama de flujo para recopilar datos de potencia demandada

En la figura 2.1, se detalla los pasos necesarios para obtener los datos necesarios para ingresar en el código AMPL, datos de potencia demanda y de costo horario de consumo eléctrico.

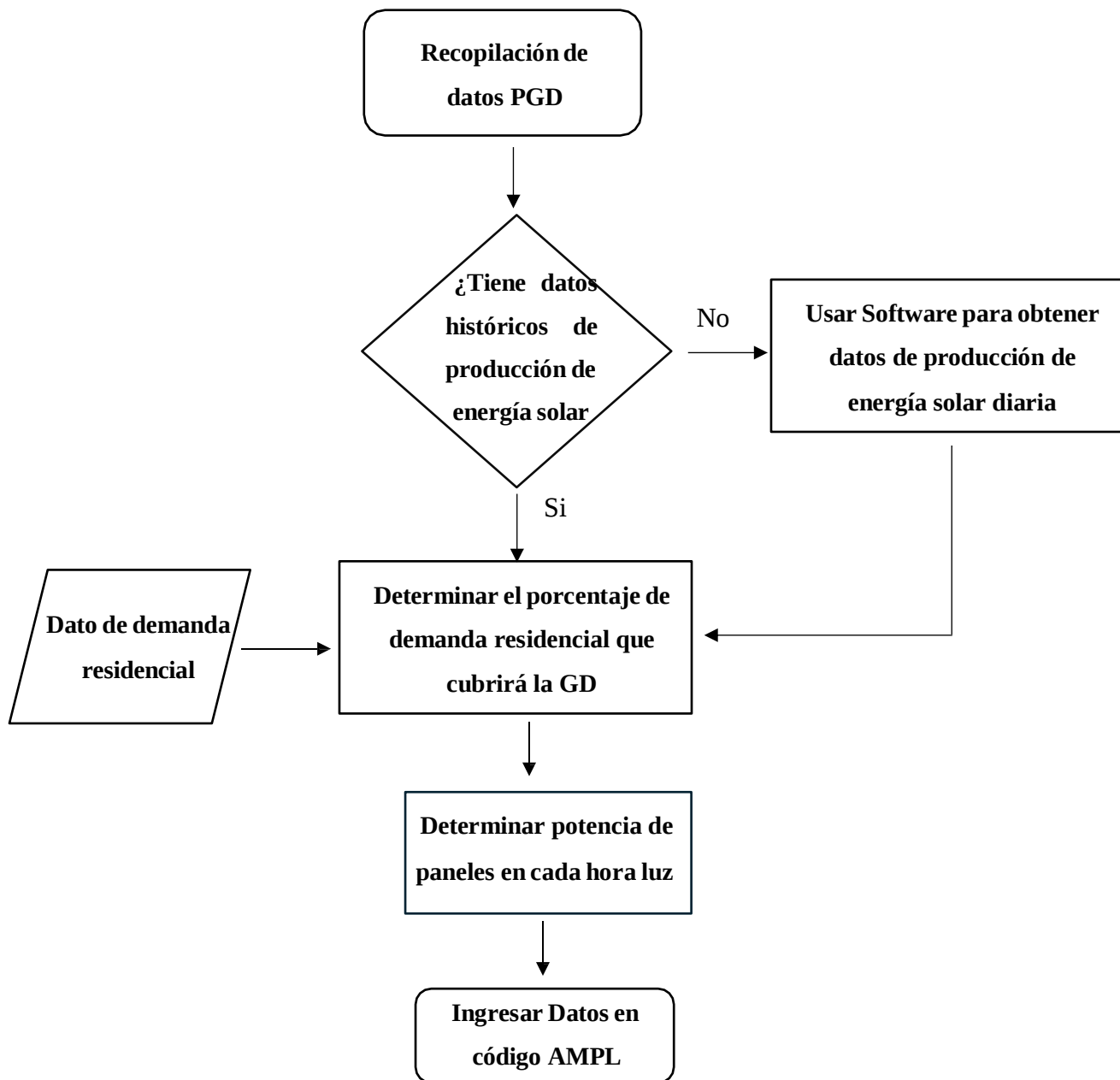


Figura 2.2: Diagrama de flujo para recopilar datos de potencia distribuida

Nota: Los dos diagramas de flujo terminar en “Ingresar datos en código AMPL”, el proceso del desarrollo del código se detalla en el apartado 2.2.6

2.2.2. Recolección de datos de consumo de demanda de vivienda – caso de estudio

En la siguiente tabla se detalla los circuitos de la vivienda de caso de estudio, para ello se detalló las cargas conectadas en cada circuito (según se especifica en la sección 1.5.2), así mismo como la característica de la protección, esto con el fin de contribuir a un desempeño del sistema eléctrico, sin causar problemas de sobrecargas y reducir de esta manera las pérdidas que se puedan generar por una mala distribución o dimensionamiento de circuito.

Tabla 2.1: Detalle de carga del tablero de distribución de caso de estudio

CUADRO DE POTENCIA DE TABLERO DE DISTRIBUCION T.D.						
CIRCUITOS	No.	WATT [W]	Fsn	DEMANDA	PROTECCION [A]	DETALLE DE LA CARGA
LUCES A1	14	210	0,55	115,5	1X15	ALUMBRADO
LUCES A2	14	210	0,55	115,5	1X15	ALUMBRADO
LUCES A3	8	120	0,55	66	1X15	ALUMBRADO
TOMAS T1	1	3000	1	3000	1X30	HORNO ELECTRICO
TOMAS T2	5	1000	0,4	400	1X20	TOMACORRIENTE
TOMAS T3	1	1800	1	1800	1X20	SECADORA
TOMAS T4	1	3500	1	3500	2X20	DUCHA ELECTRICA
TOMAS T5	1	3500	1	3500	2X20	DUCHA ELECTRICA
TOMAS T6	7	1400	0,4	560	1X20	TOMACORRIENTE
TOMAS T7	6	1200	0,4	480	1X20	TOMACORRIENTE
TOMAS T8	1	6000	1	6000	2X40	COCINA ELECTRICA
TOMAS T9	1	2500	1	2500	2X20	AIRE ACONDICIONADO
TOMAS T10	1	2500	1	2500	2X20	AIRE ACONDICIONADO
TOMAS T11	1	2500	1	2500	2X20	AIRE ACONDICIONADO
TOMAS T12	1	1500	1	1500	1X20	LAVADORA
TOMAS T13	1	250	1	250	1X20	REFRIGERADOR
		DEMANDA TOTAL [W]		28787		
		ALIMENTADOR: 2X2 + 1X4 + 1X8		2X150		

Nota: En anexo se detalla el plano de la vivienda de caso de estudio para identificar las cargas. A continuación, se presenta la Tabla 2.2, en la que se detalló que circuito esta activo en un lapso de hora específico, esto con el fin de obtener la carga demandada diaria conecta (PD) en la residencia.

Tabla 2.2: Distribución de carga durante un periodo de 24 horas

Hora	PD [KW]	Detalle de los circuitos								
1	7,75		T9-T10-T11							T13
2	7,75		T9-T10-T11							T13
3	7,75		T9-T10-T11							T13
4	7,75		T9-T10-T11							T13
5	7,5		T9-T10-T11							
6	9,047	A1 - A2- A3	T10		T2-T6-T7			T8		T13
7	10,69		T9	T1	T2-T6-T7		T4			T13
8	9,19		T9		T2-T6-T7		T5		T12	T13
9	4,99				T2-T6-T7	T3			T12	T13
10	6,00				T2-T6			T7		
11	5.90		T11					T8		T13
12	3,50		T11		T2-T7					T13
13	3,30		T11		T6-T7					T13
14	2.90		T10		T2-T6					T13
15	1.97		T9		T2					
16	2,75		T9							T13
17	4.90		T9-T10							T13
18	6,587	A1 - A2- A3	T9-T10		T6-T7					T13
19	12,587	A1 - A2- A3	T9-T10		T6-T7			T8		T13
20	9,737	A1 - A2- A3	T9-T10	T1	T2-T6-T7					
21	6,987	A1 - A2- A3	T9-T10		T2-T6-T7					T13
22	9,487	A1 - A2- A3	T9-T10-T11		T2-T6-T7					T13
23	7,75		T9-T10-T11							T13
24	7,75		T9-T10-T11							T13

2.2.3. Pliego tarifario del consumo eléctrico en KWh

A continuación, se detalla los precios del KWh del servicio público de energía eléctrica para el 2024, publicado el 30 de noviembre del 2023, mediante resolución Nro. ARCERNRRR 034-2023, en función de la potencia consumida mensual.

Tabla 2.3: Tarifas del servicio de energía eléctrica para el año 2024

Grupo de KWh	Rango de consumo en Kilovatios - hora (KWh)		Valor KWh
	Desde	Hasta	
50	1	50	\$ 0,0910
50	51	100	\$ 0,0930
50	101	150	\$ 0,0950
50	151	200	\$ 0,0970
50	201	250	\$ 0,0990
50	251	300	\$ 0,1010
50	301	350	\$ 0,1030
150	351	500	\$ 0,1050
200	501	700	\$ 0,1285
300	701	1000	\$ 0,1450
500	1001	1500	\$ 0,1709
1000	1501	2500	\$ 0,2752
1000	2501	3500	\$ 0,4360
	3501	Superior	\$ 0,6812

Nota: Datos tomados de la Corporación Nacional de Electricidad (CNEL EP)

2.2.4. Análisis de ecuaciones para el caso de estudio - Residencia con generación distribuida y almacenamiento

Para el caso de estudio, se consideró una residencia con generación distribuida y con almacenamiento de energía como se ilustra en la figura 2.3. En este caso, la demanda de la residencia es cubierta en parte por la red de distribución y por la fuente de generación distribuida, además el sistema del caso de estudio cuenta con almacenamiento de energía para cubrir en la hora que hay baja producción por parte de la generación distribuida, en este caso se considera siempre, la prioridad de la energía proveniente de la generación distribuida o de las baterías.

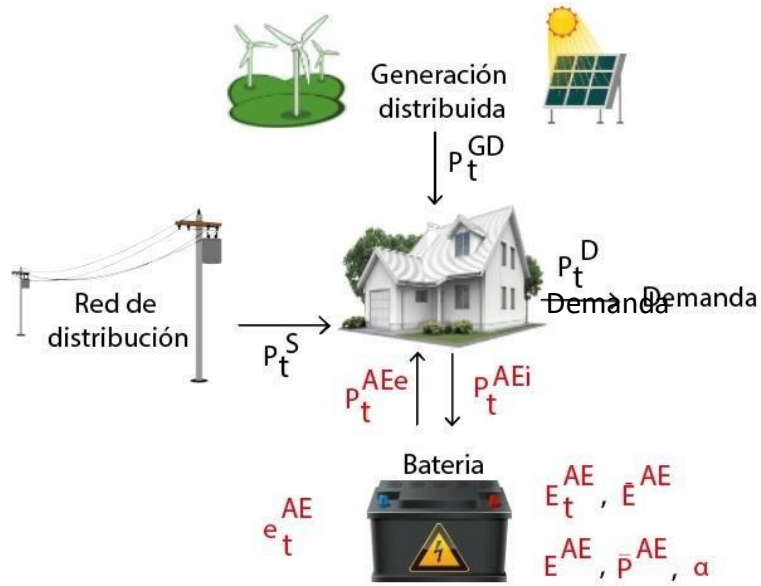


Figura 2.3: Sistema de caso de estudio de gestión de energía con generación distribuida y almacenamiento de energía

Consideraciones para el almacenamiento de energía:

- La energía se puede almacenar en dos casos:
 - Cuando la energía enviada por las fuentes renovables exceda lo solicitado por el sistema.
 - Cuando el costo de la energía proveniente de la red de distribución sea más barato.
- El almacenador de energía funciona durante 24 horas.

Ecuaciones de modelamiento del sistema de energía de potencia activa residencial

función para optimizar:

$$Costo_{total} = \delta \sum_{t \in T} C_t^{OS} * P_t^S \quad (2-1)$$

Condiciones:

$$P_T^S + P_T^{GD} = P_T^D + P_T^{AEe} - P_T^{AEi} \quad \forall t \in T \quad (2-2)$$

$$E_t^{AE} = E_{t-1}^{AE} + \alpha * \delta * P_T^{AEe} - \delta * \frac{P_t^{AEi}}{\alpha} \quad \forall t \in \frac{T}{t} > 1 \quad (2-3)$$

$$E_t^{AE} = E^{AE0} + \alpha * \delta * P_T^{AEe} - \delta * \frac{P_t^{AEi}}{\alpha} \quad \forall t \in \frac{T}{t} = 1 \quad (2-4)$$

$$0 \leq P_t^{AEi} \leq P^{AE} * e_t^{AE} \quad \forall t \in T \quad (2-5)$$

$$0 \leq P_t^{AEe} \leq P^{AE} * (1 - e_t^{AE}) \quad \forall t \in T \quad (2-6)$$

$$0 \leq E^{AE} \leq E^{AE} \quad \forall t \in T \quad (2-7)$$

$$P_t^S \geq 0 \quad \forall t \in T \quad (2-8)$$

$$e_t^{AE} \in \{0,1\} \quad \forall t \in T \quad (2-9)$$

Consideraciones para el caso de estudio:

Para el este caso de estudio, se consideró que; P_t^{AEi} es la potencia activa que está inyectando las baterías a la carga en un intervalo t, y al mismo tiempo esta se está descargando. Caso contrario es P_t^{AEe} , la cual es la potencia activa que las baterías están extrayendo en un intervalo t, y al mismo tiempo se está cargando. e_t^{AE} es el estado de operación de las baterías, “1” significa que está inyectando energía a las cargas y al mismo tiempo de esta descargando y “0” significa que está extrayendo energía de la generación distribuida para almacenarla en un intervalo de tiempo t. E_t^{AE} representa la energía en las baterías en un intervalo de tiempo t. Se considero que la potencia activa máxima de inyección (descarga) y extracción (carga) $P^{AE} = 5 \text{ Kw}$. Se considero además que la capacidad máxima de energía de las baterías es $E^{AE} = 10 \text{ KWh}$. La eficiencia de las baterías es de $\alpha = 90\%$ y por último la energía inicial de las baterías es $E^{AE0} = 0$.

Condiciones para el estado del conjunto de almacenamiento de energía:

- **Inyección (descarga)**

$$e_t^{AE} = 1 \quad (2-10)$$

$$0 \leq P_t^{AEi} \leq P^{AE} \quad (2-11)$$

$$P_t^{AEe} = 0 \quad (2-12)$$

- **Extracción (carga)**

$$e_t^{AE} = 0 \quad (2-13)$$

$$P_t^{AEi} = 0 \quad (2-13)$$

$$0 \leq P_t^{AEe} \leq P^{AE} \quad (2-14)$$

2.2.5. Desarrollo de modelo de optimización en AMPL

A continuación, se detalla los pasos para desarrollar el código en ampla, desde el ingreso de datos hasta la ejecución para mostrar los resultados. Esto muestra cómo se llevó a cabo el proceso del código.

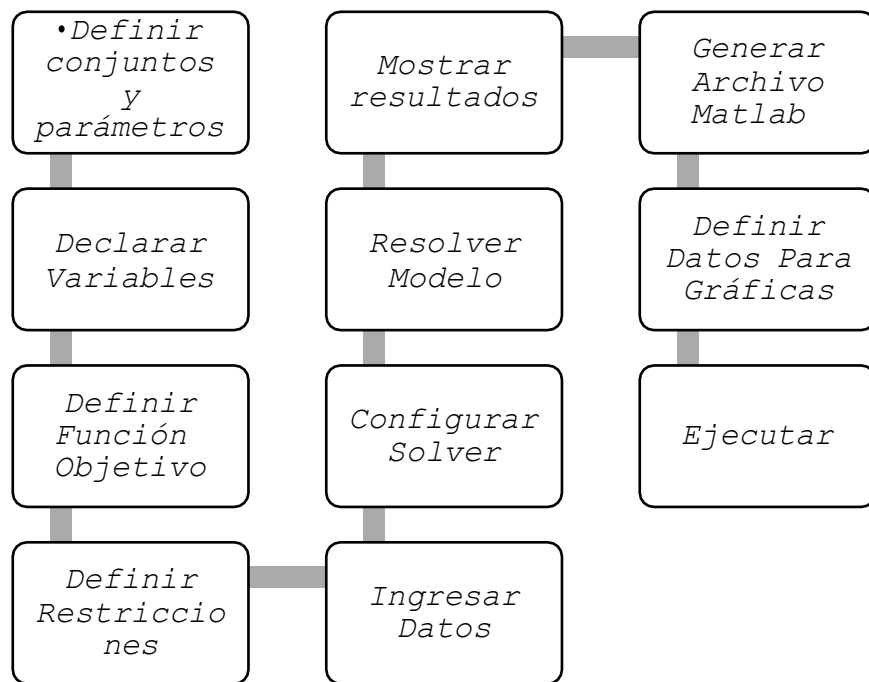


Figura 2.4: Pasos a seguir para desarrollar el código en AMPL

Nota: En la sección de anexos se detalla el código de AMPL

2.2.6. Análisis de los diferentes casos de estudio

A continuación, se plantea distintos casos de estudios de eficiencia energética, los cuales nos sirvió para realizar comparaciones con nuestro caso de estudio.



Figura 2.5: Caso básico de gestión de demanda residencial

Este caso es el más usado, la red de distribución cubre la demanda de energía eléctrica total de la residencia. En este caso se da a conocer el valor en dólares del consumo eléctrico real sin ningún tipo de implementación adicional en el sistema.



Figura 2.6: Gestión de energía residencial con generación distribuida

Para este segundo caso de estudio, se considera que la demanda energética de la residencia se reparte entre la generación distribuida y la proveniente de la red de distribución, considerando que el sistema siempre prioriza la energía proveniente de la generación distribuida.

Nota: Adicional a este apartado, está el diagrama de caso de caso estudio (Véase sección 2.2.4)

2.2.7. Producción energética y radiación solar promedio

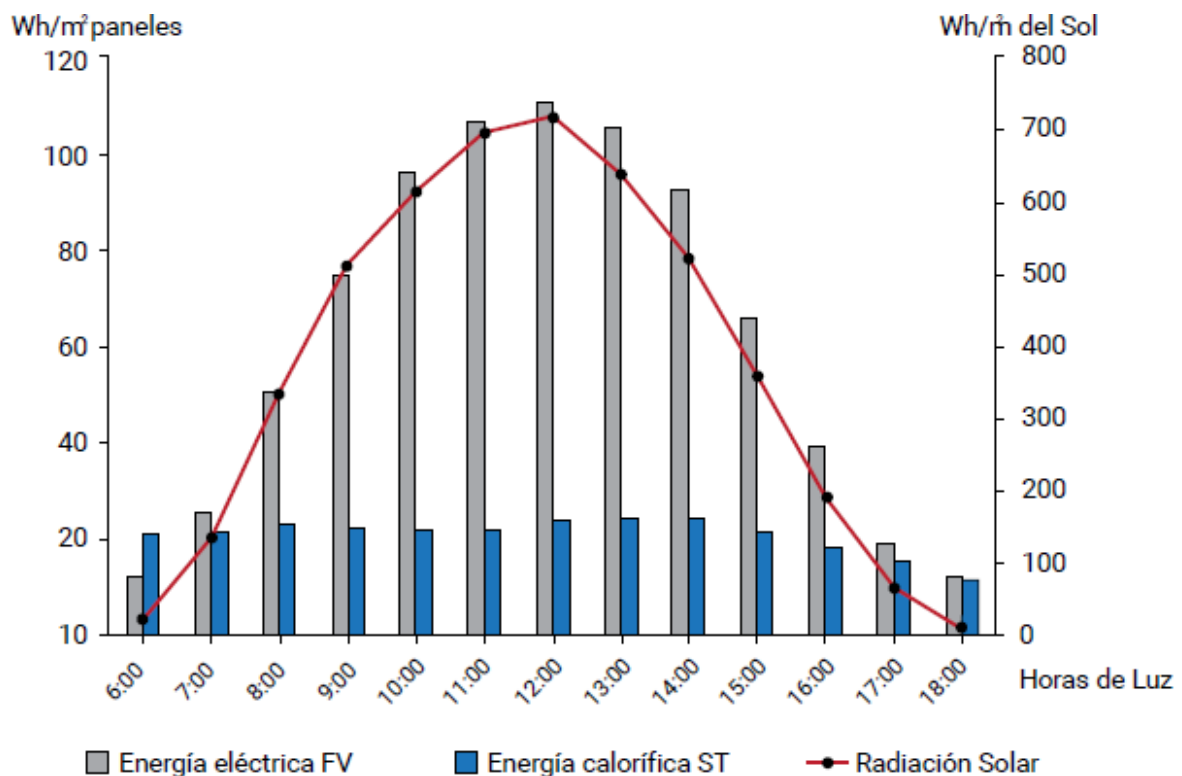


Figura 2.7: Generación de energía de los paneles fotovoltaicos en un lapso de un día solar

Nota: Fuente: [7]

Mes	Radiación solar (kWh/m ²)	
	Diaria	Mensual
May-15	3,67	113,73
Jun-15	3,46	103,94
Jul-15	3,74	116,05
Ago-15	4,02	124,76
Sept-15	3,61	108,43
Oct-15	3,68	114,05
Nov-15	3,25	97,53
Dic-15	3,18	98,67
Ene-16	3,37	104,55
Feb-16	3,98	115,38
Mar-16	4,58	141,94
Abr-16	4,68	140,5
Promedio	3,77	114,96
Máximo	4,68	141,94
Mínimo	3,18	97,53

Tabla 2.4: Radiación solar promedio por día y por mes

Nota: Fuente [7]

En la figura 2.7, se observa la producción energética de los paneles fotovoltaicos, en un periodo de 24 horas, en la que se considera la producción en horas luz, estos datos son promedios, recopilados durante un año.

Mediante esta información, se obtuvo la producción de energía distribuida para generar los datos necesarios para incorporarlos en el software.

2.2.8. Especificaciones técnicas, éticas y legales del proyecto

Especificaciones técnicas:

- **Normativas eléctricas:** Normas que se deben de cumplir como el NEC (National Electrical Code), Normas Ecuatorianas de la construcción (NEC) y las norma IEC 60617 para asegurar la seguridad y eficiencia de las instalaciones eléctricas.
- **Software de optimización AMPL:** Esta basado en algebra matemática, permite modelos lineales y no lineales, modelos mixtos y entre otros. Funciona con Windows, macOS y Linux. Permite la integración en lenguaje Python, C, C++ y Java.
- **Estudio de demanda de energía eléctrica:** El estudio de demanda está en función de las especificaciones de los entes regulatorios para posteriormente ser aceptado por los mismos. Y consiste en análisis de carga y patrones de consumo en la residencia.

Especificaciones éticas:

- **Compromisos ambientales:** Compromiso con la reducción de la huella de carbono y el uso sostenible de los recursos energéticos y aporte con la demanda nacional de energía.

- **Transparencia:** Se asegura que los datos de consumo y generación de energía sean accesibles y comprensibles para los usuarios para realizar futuras implementaciones al proyecto.
- **Equidad:** Considera el acceso del proyecto para todos los usuarios, y el acceso a la energía, evitando practicas discriminativas a ciertos grupos.

Especificaciones legales:

- **Licencias y permisos:** Obtención de las licencias necesarias para el estudio del sistema eléctrico y el estudio de la implementación de la generación distribuida.
- **Derechos de autor:** Se asegura que los derechos de autor relacionados con los softwares se respetaran en todo momento.
- **Regulación de seguridad:** Cumplimiento en todo momento con las regulaciones locales y nacionales sobre la seguridad eléctrica y las instalaciones del sistema de generación distribuida tomando en cuenta normas establecidas.

3. Capítulo 3

3.1. Determinación de potencia de generación distribuida

En la sección 2.2.7 se detalla el estudio previo de recopilación de potencia de generación fotovoltaica en horas luz para una potencia pico de 110 Wh.

En base a estos valores, se logra estimar los valores de potencia de generación fotovoltaica para implementar en el proyecto con una demanda de energía diaria de 7 KW por parte de los paneles solares, dando como resultados la siguiente gráfica:

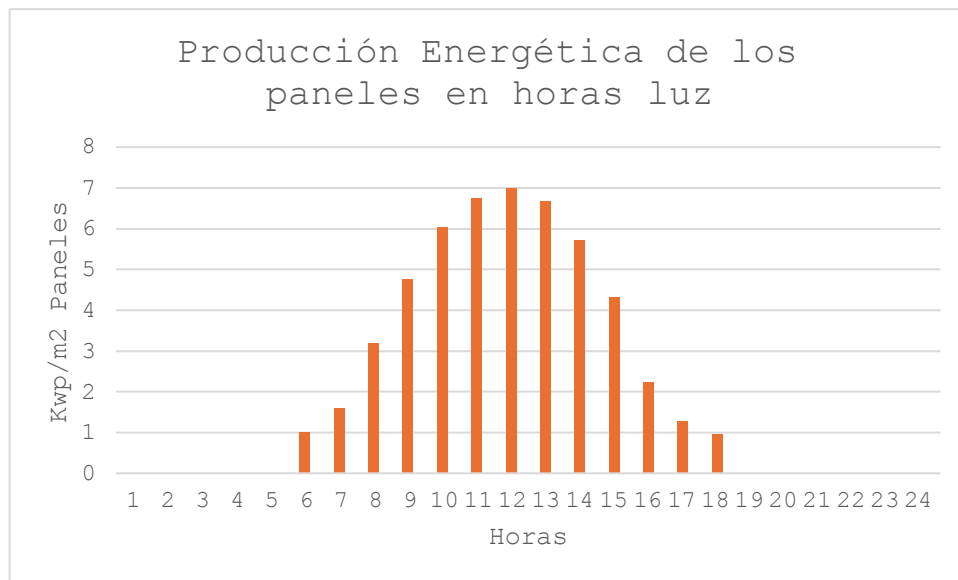


Figura 3.1: Grafico de producción de energía fotovoltaica en horas luz

Como resultado de la gráfica de producción de energía fotovoltaica en horas luz, podemos observar que mantiene el patrón de la Figura 3.1, la cual corresponde a un estudio de generación fotovoltaica en horas luz, en un periodo de 24 horas.

Se debe de tener en cuenta, que a las 12:00 am, se obtiene la máxima potencia pico generada por parte de los paneles solares, el cual es de 7 KW.

Nota: La potencia de 7 KW fue elegida en base a diferentes resultados del software, Tabla 3.12.

3.2. Resultados de datos de potencia de generación distribuida

Según los diagramas de flujo de proceso (figura 2.1 y 2.2), ya tenemos los datos de potencia demandada cada hora (Tabla 2.2). En la Tabla 3.1 se detalla los datos recopilados para ser ingresados en el código AMPL, según los diagramas de flujo de proceso mencionados.

Tabla 3.1: Datos de demanda horaria, de generación distribuida (solar) en un periodo de 24 horas

Hora	PD [KW]	PGD [KW]
1	7,75	0,0000
2	7,75	0,0000
3	7,75	0,0000
4	7,75	0,0000
5	7,5	0,0000
6	9,047	1,0182
7	10,69	1,5909
8	9,19	3,1818
9	4,99	4,7727
10	6,96	6,0455
11	6,25	6,7455
12	3,63	7,0000
13	3,79	6,6818
14	3,71	5,7273
15	2,9	4,3273
16	2,75	2,2273
17	5,25	1,2727
18	6,587	0,9545
19	12,587	0,0000
20	9,737	0,0000
21	6,987	0,0000
22	9,487	0,0000
23	7,75	0,0000
24	7,75	0,0000

Como resultados tenemos la columna de la potencia de demanda (PD) obtenidas previamente de la Tabla 2.2. Además, se obtiene como resultado la potencia de generación distribuida (PG), la cual fue obtenida de la figura 3.1

3.3. Resultados del costo por consumo eléctrico por hora para los diferentes casos

A continuación, se analizará cada caso (caso 1,2 y 3) para determinar el valor de facturación diaria necesaria para ingresar en el código AMPL, basándonos en el costo de facturación mensual al usar el costo de pliego tarifario por consumo eléctrico (Tabla 2.3).

A continuación, se detalla paso a paso para determinar el costo horario de consumo eléctrico para cada caso.

Tabla 3.2: Datos de potencia suministrados diarios y mensuales para cada caso

	KW Diarios	KW Mensual
Caso1	164,52	\$ 5100,12
Caso2	125,96	\$ 3903,9571
Caso3	117,55	\$ 3644,05

Tabla 3.3: Tabla de pliego tarifario con total de potencia y costo

Rango de consumo	Grupo de KWh	Costo KWh	Total \$
1_50	50	0,091	\$ 4,55
51_100	50	0,093	\$ 4,65
101_150	50	0,095	\$ 4,75
151-200	50	0,097	\$ 4,85
201-250	50	0,099	\$ 4,95
251-300	50	0,101	\$ 5,05
301-350	50	0,103	\$ 5,15
351-500	150	0,105	\$ 15,75
501-700	200	0,1285	\$ 25,70
701-1000	300	0,145	\$ 43,50
1001-1500	500	0,1709	\$ 85,45
1501-2500	1000	0,2752	\$ 275,20
2501-3500	1000	0,436	\$ 436,00
Total KWh (1)	3500	Total de grupo \$ (2)	\$ 915,55

La tabla 3.3, se detalla el total del KWh de los grupos de potencia y de misma manera el costo mensual correspondiente a total de los grupos, en caso se considera que el consumo mensual es de 3500 KW. Esto datos nos sirve para los tres casos analizados, debido a que, en caso de ser el consumo mensual mayo a 3500 KWh, (según tabla de pliego tarifario) esa potencia adicional tiene un costo de \$0.6812 dólares. Cabe recalcar que el costo tarifario se saca con la potencia mensual, que para este proyecto se considera meses de 31 días.

Tabla 3.4: Calculo de costo del KWh para el caso 1

		Costo KWH	Total \$ (3)
Potencia (1)	3500		
Potencia mayor a 3500	1600,18	0,6812	\$ 1.090,04
Consumo mensual	5100,18		
Total (2) + (3)	\$ 2.005,59		
COMERCIALIZACION	\$ 1,41		
TOTAL	\$ 2.007,00		
Costo por KWh	\$ 0,3935		

Tabla 3.5: *Calculo de costo del KWh para el caso 2*

		Costo KWH	Total \$ (3)
Potencia (1)	3500		
Potencia mayor a 3500	403,96	0,6812	\$ 275,18
Consumo mensual	3903,96		
Total (2) + (3)	\$ 1.190,73		
COMERCIALIZACION	\$ 1,41		
TOTAL	\$ 1.192,14		
Costo por KWh	\$ 0,3054		

Tabla 3.6: *Calculo de costo del KWh para el caso 3*

		Costo KWH	Total \$ (3)
Potencia (1)	3500		
Potencia mayor a 3500	144,05	0,6812	\$ 98,13
Consumo mensual	3644,05		
Total (2) + (3)	\$ 1.013,68		
COMERCIALIZACION	\$ 1,41		
TOTAL	\$ 1.015,09		
Costo por KWh	\$ 0,2786		

Tanto en la Tabla 3.4, 3.5 y 3.6, se detalló el cálculo para determinar el valor del KWh, para los diferentes casos, esto es debido a que la potencia suministrada por la red es diferente para los tres casos (Tabla 3.2).

3.4. Resumen de datos para ingresar en el código AMPL

A continuación, se presenta una tabla en forma de resumen, de los datos necesarios para ingresar el código de AMPL para analizar cada caso.

Tabla 3.7: Resumen de datos necesarios de cada caso para el código

Hora	PD [KW]	PGD [KW]	KWh		
			Caso 1	Caso 2	Caso 3
1	7,75	0,0000	0,3935	0,3054	0,2786
2	7,75	0,0000	0,3935	0,3054	0,2786
3	7,75	0,0000	0,3935	0,3054	0,2786
4	7,75	0,0000	0,3935	0,3054	0,2786
5	7,5	0,0000	0,3935	0,3054	0,2786
6	9,047	1,0182	0,3935	0,3054	0,2786
7	10,69	1,5909	0,3935	0,3054	0,2786
8	9,19	3,1818	0,3935	0,3054	0,2786
9	4,99	4,7727	0,3935	0,3054	0,2786
10	6	6,0455	0,3935	0,3054	0,2786
11	5,9	6,7455	0,3935	0,3054	0,2786
12	3,5	7,0000	0,3935	0,3054	0,2786
13	3,3	6,6818	0,3935	0,3054	0,2786
14	2,9	5,7273	0,3935	0,3054	0,2786
15	1,97	4,3273	0,3935	0,3054	0,2786
16	2,75	2,2273	0,3935	0,3054	0,2786
17	4,9	1,2727	0,3935	0,3054	0,2786
18	6,587	0,9545	0,3935	0,3054	0,2786
19	12,587	0,0000	0,3935	0,3054	0,2786
20	9,737	0,0000	0,3935	0,3054	0,2786
21	6,987	0,0000	0,3935	0,3054	0,2786
22	9,487	0,0000	0,3935	0,3054	0,2786
23	7,75	0,0000	0,3935	0,3054	0,2786
24	7,75	0,0000	0,3935	0,3054	0,2786

3.5. Resultados para diferentes casos mostrados

Los casos mencionados son los tratados en la sección 2.2.4 y 2.2.6, los cuales le hemos llamado, caso básico (caso 1), caso con generación distribuida sin almacenamiento (caso 2) y caso con generación distribuida y almacenamiento de energía (caso3) y los resultados se mostrarán a continuación, los cuales son entregado por el software.

3.5.1. Caso básico

Este caso, es el cual solo recibe energía de la red de distribución para satisfacer la demanda residencial y como datos, solo ingresan datos de demanda horario y de tarifa por el consumo eléctrico.

Tabla 3.8: Resultados de optimización para el caso básico

costo_total		64.7559
Hora	PS [kw]	PD [KW]
1	7,75	7,75
2	7,75	7,75
3	7,75	7,75
4	7,75	7,75
5	7,5	7,5
6	9,047	9,047
7	10,69	10,69
8	9,19	9,19
9	4,99	4,99
10	6	6
11	5,9	5,9
12	3,5	3,5
13	3,3	3,3
14	2,9	2,9
15	1,97	1,97
16	2,75	2,75
17	4,9	4,9
18	6,587	6,587
19	12,587	12,587
20	9,737	9,737
21	6,987	6,987
22	9,487	9,487
23	7,75	7,75
24	7,75	7,75

Como resultados tenemos, el costo real diario de consumo si no se dispone de una generación distribuida, este caso es idóneo para realizar comparaciones con el caso 2 y caso 3 (caso de estudio). Adicional a este caso, es el cual podemos encontrar en muchos hogares ecuatorianos.

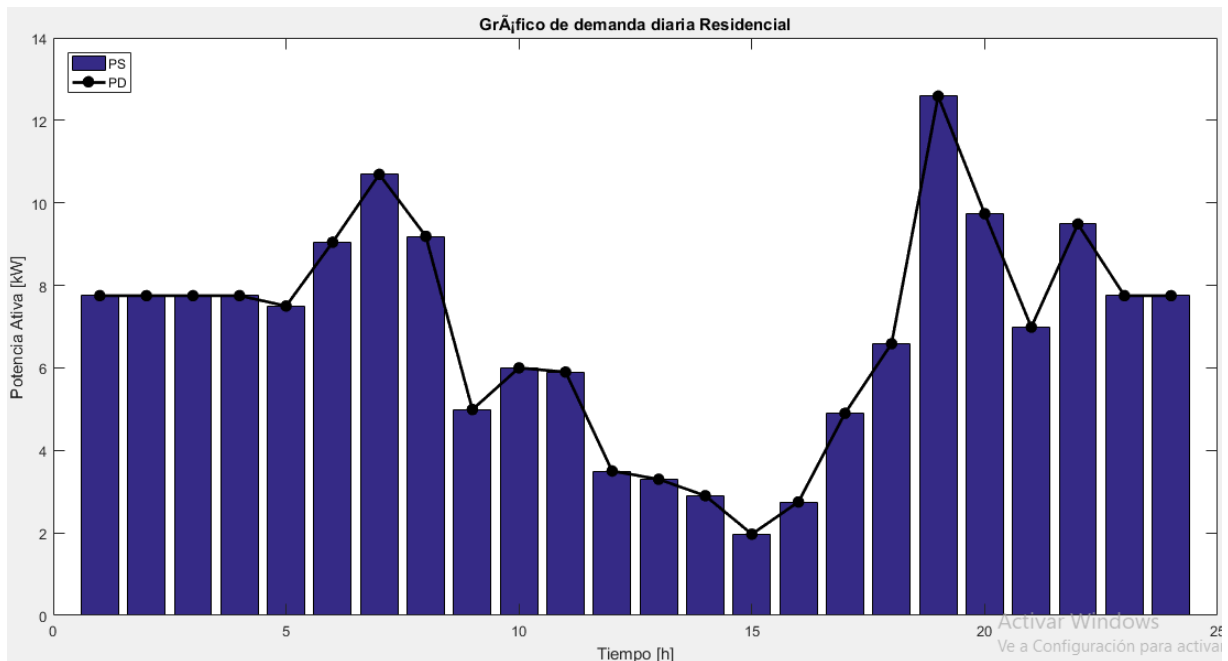


Figura 3.2: *Grafico de demanda diaria de la residencia para el caso básico*

En la figura 3.2, observamos que la demanda horaria es cubierta al 100% por la red de distribución, por lo que tiene lógica que, el costo diario de consumo eléctrico sea el máximo en comparación con los otros casos y, además es un costo que no varía a lo largo de un mes.

3.5.2. *Caso con Generación distribuida sin almacenamiento de energía*

Para este caso, para satisfacer la demanda residencial, se recibe energía desde la red de distribución y de la generación distribuida, cabe mencionar que la potencia de la generación distribuida es de 7 KW, como ya se ha mencionado antes y además el código recibe todos los datos de la Tabla 3.1, es decir datos de PGD a diferencia del caso 1. Y nos da como resultados la siguiente tabla:

Tabla 3.9: Resultados para el caso con generación distribuida

costo_total \$		38.4603	
Hora	PS [kw]	PD [KW]	PGD [KW]
1	7,75	7,75	0
2	7,7500	7,75	0
3	7,75	7,75	0
4	7,75	7,75	0
5	7,5	7,5	0
6	8,0289	9,047	1,01818
7	9,0991	10,69	1,59091
8	6,0082	9,19	3,18182
9	0,2173	4,99	4,77273
10	0,0000	6	6,04545
11	0,0000	5,9	6,74545
12	0,0000	3,5	7,00000
13	0,0000	3,3	6,68182
14	0,0000	2,9	5,72727
15	0,0000	1,97	4,32727
16	0,5228	2,75	2,22727
17	3,6273	4,9	1,27273
18	5,6325	6,587	0,95455
19	12,587	12,587	0
20	9,7370	9,737	0
21	6,987	6,987	0
22	9,487	9,487	0
23	7,75	7,75	0
24	7,75	7,75	0

Como resultados, observamos el costo diario de consumo eléctrico de \$38.4603 dólares, el cual es un costo menor respecto al caso 1. Podemos observar en la Tabla 3.9, el cual son datos entregados por el software AMPL, que la potencia suministrada (PS) por la red, es la necesaria para cubrir la demanda, priorizando siempre la potencia de generación distribuida (PGD), es decir, que la potencia demandada (PD) es igual a la suma de la potencia PS y PGD. Por ello, en las horas que no existe PGD, la energía necesaria es suministrada 100% por la red y también se da el caso de que, la potencia PS es de cero KW, debido a que la PD es cubierto 100% por la potencia PGD. Este último caso, nos da como resultado que, exista un exceso de energía de PGD que no es aprovechada para ciertas horas, como es el caso para las 12:00 am, el cual existe un exceso de energía que no es utilizada, de manera general desde las 11:00 am a 15:00 pm existe una energía que no está siendo utilizada, esto es una desventaja en comparación con el caso 3.

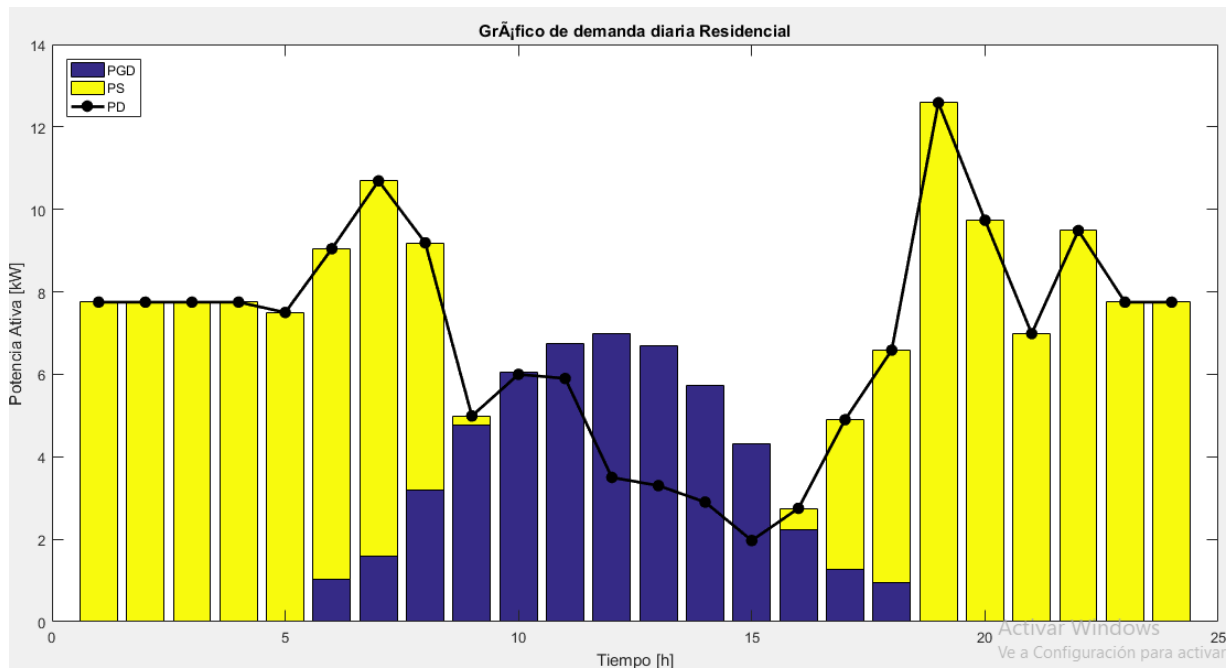


Figura 3.3: *Gráfico de demanda diaria de la residencia para el caso con generación distribuida sin almacenamiento*

En la figura, observamos mejor lo que se trató de explicar anteriormente, la franja amarilla es la PS por la red de distribución para cubrir la demanda horaria, en la que podemos observar que existen horas en las que la demanda es cubierta al 100 % por la red, y en otro existe una combinación entre la PS y la PGD para cubrir la demanda horaria. Como se mencionó, como resultado para este caso, tenemos un exceso de energía la cual no es utilizada para nada, y esto ocurre en el periodo de 11:00 am a 15:00 pm. Esto nos sirve para comparar con nuestro caso de estudio, que es el siguiente.

3.5.3. *Caso de estudio con generación distribuida y almacenamiento de energía*

Estos resultados corresponden al caso de estudio seleccionado, el cual cuenta con generación distribuida y almacenamiento de energía (baterías), la ventaja de este caso de estudio es que el exceso de energía proveniente de la generación distribuida es enviado a las baterías y aprovechada en las horas de menor generación fotovoltaica, dando, así como resultado un costo diario menor comparado con el caso 2 y al mismo tiempo es menor al caso 1. Así obtenemos por medio del software AMPL los resultados mostrados en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10: Resultados de optimización para el caso de estudio con generación distribuida almacenamiento de energía

costo_total \$		32.7493					
Hora	PS [kw]	PD [KW]	PGD [KW]	PAEi [KW]	PAEe [KW]	EAE [KWh]	eAE
1	7,75	7,75	0	0	0	0	1
2	7,75	7,75	0	0	0	0	1
3	7,75	7,75	0	0	0	0	1
4	7,75	7,75	0	0	0	0	1
5	7,5	7,5	0	0	0	0	1
6	8,0289	9,047	1,01818	0	0	0	1
7	9,0991	10,69	1,59091	0	0	0	1
8	6,0082	9,19	3,18182	0	0	0	1
9	0,2173	4,99	4,77273	0	0	0	1
10	0	6	6,04545	0	0,0454	0,0389	0
11	0	5,9	6,74545	0	0,8454	0,7616	0
12	0	3,5	7,00000	0	3,5000	3,7254	0
13	0	3,3	6,68182	0	3,3818	6,4467	0
14	0	2,9	5,72727	0	2,8272	8,5603	0
15	0	1,97	4,32727	0	2,1521	10,0000	0
16	0	2,75	2,22727	0,5228	0	8,9705	1
17	0	4,9	1,27273	3,6273	0	4,7050	1
18	1,398	6,587	0,95455	4,2345	0	0	1
19	12,587	12,587	0	0	0	0	1
20	9,7370	9,737	0	0	0	0	1
21	6,987	6,987	0	0	0	0	1
22	9,487	9,487	0	0	0	0	1
23	7,75	7,75	0	0	0	0	1
24	7,75	7,75	0	0	0	0	1

Para este caso, es necesario recordar las variables presentes justificadas en la sección 2.2.5, aparte de las variables ya conocidas, tenemos la variable potencia activa inyectado por el almacenador (PAEi) a las cargas, la potencia activa extraída por el almacenados (PAEe) del excedente de la PGD y la potencia almacenada en las baterías en un intervalo de tiempo (EAE). A diferencia del caso dos, ahora el excedente de energía es extraída e inyectada a las baterías (PAEe), cuando esto ocurre, por mencionar a las 10:00 am, esta energía es enviada a las baterías (EAE) y podemos observar que no es el mismo valor, debido a la eficiencia de las baterías del 90%. Ahora observamos que, a la siguiente hora, también existe un exceso de energía que será enviado a las baterías, lo cual, considerando la eficiencia de las baterías, esta se suma a la energía previamente almacenada. Vemos además que hasta las 15:00 pm, la variable PAEi se ha mantenido en cero, recordemos que esto indica si existe energía inyectada por parte de las

baterías para cubrir la demanda. A las 15:00 pm, podemos observar que las baterías han llegado a su máxima capacidad de almacenamiento de energía que es de 10 KW que es un valor ingresado en el código de AMPL, es decir que más de eso no podrá almacenar y si existe más energía excedente no habrá como almacenarlo y el código muestra resultados de ceros. Además, en esta misma hora, podemos observar que la energía extraída llega a su fin y en la siguiente hora es de cero. Ahora observamos que desde las 16:00 pm a 18:00 pm, la variable PAEi ha empezado a extraer energía de las baterías para cubrir la demanda horaria y al mismo tiempo observamos que la variable EAE empieza a restarse el valor de energía inyectada a la carga considerando la eficiencia de carga y descarga de las baterías. De manera general el código de AMPL siempre busca optimizar la gestión de energía, priorizando la energía de PGD y la EAE, esto debido a que busca optimar el costo por consumo eléctrico diario. Recordemos que para este caso la suma PD y PGD es igual a la suma de las potencias PS, PAEe menos la PAEi.

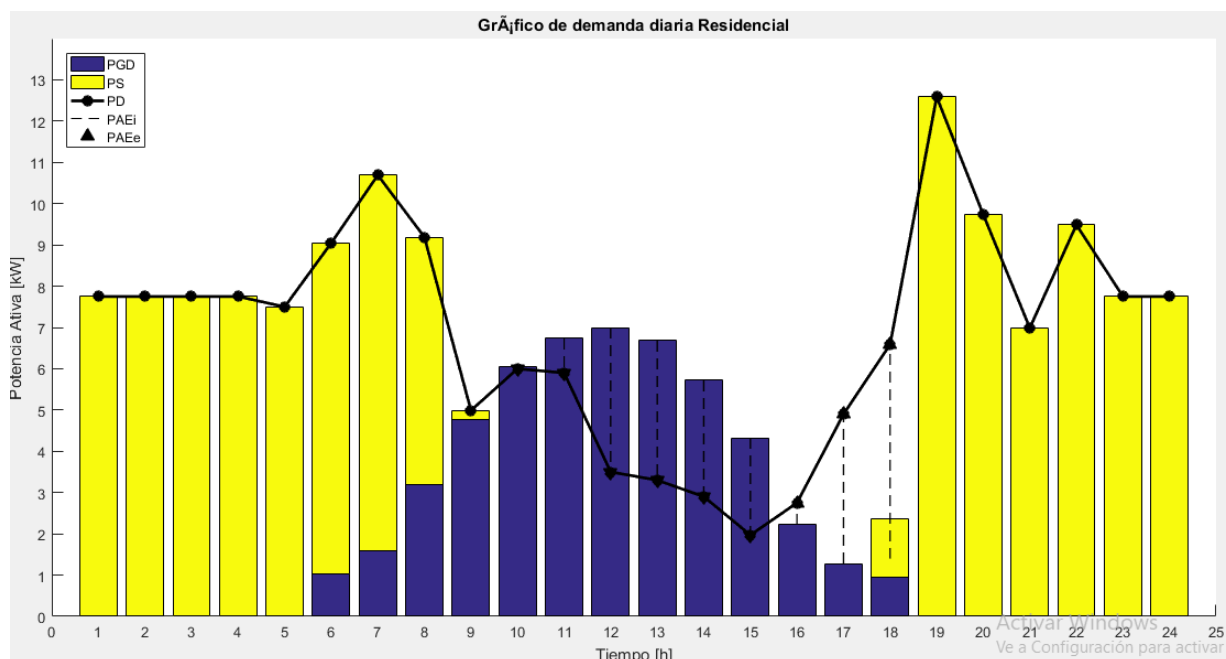


Figura 3.4: Gráfico de demanda diaria de la residencia para el caso de estudio

En la gráfica 3.5, podemos observar las barras de mismo color que en el caso 2, con la diferencia de las líneas Inter puntadas que van hacia la demanda, en el caso de existir un exceso de energía, las líneas indican que la energía está siendo extraída hacia las baterías y podemos observar el caso en que las baterías suplen la demanda, como es el caso de las 16:00 y 17:00 pm, en la que existe una combinación de la energía de la PGD y la energía PAEi. En el caso de las 18:00 pm, existe una combinación de la PS, PGD y PAEi para suplir la demanda.

3.6. Comparación de costos de energía eléctrica de los diferentes casos analizados

Una vez obtenido los resultados de los tres casos mencionados, se hizo un resumen de los costos diarios, mensuales y anuales por el pago por consumo eléctrico para cada caso, y se procedió a realizar una comparación en costos anuales, comparando caso 2 con caso 1 y caso 3 con caso 1, y por último una comparación de costos anuales del caso de estudio (caso3) con el caso 2, dando los siguientes resultados expuestos en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11: Comparación de costos anuales de los diferentes casos analizados

Caso	Detalle	Costo diario	Costo mensual	Costo Anual	Comparación caso 1	comparación caso 2
1	Caso Básico	\$ 64,7579	\$ 2.007,49	\$ 24.089,94	-----	-----
2	Con GD	\$ 38,4602	\$ 1.192,27	\$ 14.307,19	\$ 9.782,74	-----
3	Con GD y almacenador de energía	\$ 32,7493	\$ 1.011,07	\$ 12.132,89	\$ 11.957,05	\$ 2.174,30

3.7. Curva de resultados de costos anuales al analizar diferentes potencias de generación distribuida para casos analizados

A continuación, se determinó las potencias de generación distribuida para diferentes potencias máximas y se procedió a ingresar en el código AMPL, tanto para el caso 2 y caso 3 (Tabla 3.12) y se obtuvo los diferentes costos diarios por consumo y se procedió a llevarlos a costos anuales (Tabla 3.13).

Tabla 3.12: Datos de potencia fotovoltaica para distintas horas luz

Horas	Pbase [KW]	P1 [KW]	P2 [KW]	P3 [KW]	P4 [KW]	P5 [KW]	P6 [KW]	P7 [KW]	P8 [KW]	P9 [KW]	P10 [KW]	P11 [KW]
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	16	0,6982	0,7273	0,8000	0,8727	1,0182	1,1636	1,3091	1,4545	1,6000	1,8909	2,1818
7	25	1,0909	1,1364	1,2500	1,3636	1,5909	1,8182	2,0455	2,2727	2,5000	2,9545	3,4091
8	50	2,1818	2,2727	2,5000	2,7273	3,1818	3,6364	4,0909	4,5455	5,0000	5,9091	6,8182
9	75	3,2727	3,4091	3,7500	4,0909	4,7727	5,4545	6,1364	6,8182	7,5000	8,8636	10,2273
10	95	4,1455	4,3182	4,7500	5,1818	6,0455	6,9091	7,7727	8,6364	9,5000	11,2273	12,9545
11	106	4,6255	4,8182	5,3000	5,7818	6,7455	7,7091	8,6727	9,6364	10,6000	12,5273	14,4545
12	110	4,8000	5,0000	5,5000	6,0000	7,0000	8,0000	9,0000	10,0000	11,0000	13,0000	15,0000
13	105	4,5818	4,7727	5,2500	5,7273	6,6818	7,6364	8,5909	9,5455	10,5000	12,4091	14,3182
14	90	3,9273	4,0909	4,5000	4,9091	5,7273	6,5455	7,3636	8,1818	9,0000	10,6364	12,2727
15	68	2,9673	3,0909	3,4000	3,7091	4,3273	4,9455	5,5636	6,1818	6,8000	8,0364	9,2727
16	35	1,5273	1,5909	1,7500	1,9091	2,2273	2,5455	2,8636	3,1818	3,5000	4,1364	4,7727
17	20	0,8727	0,9091	1,0000	1,0909	1,2727	1,4545	1,6364	1,8182	2,0000	2,3636	2,7273
18	15	0,6545	0,6818	0,7500	0,8182	0,9545	1,0909	1,2273	1,3636	1,5000	1,7727	2,0455
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

En la Tabla 3.12, podemos observar los datos de generación de energía fotovoltaica del caso en que nos basamos (sección 2.2.8), en la columna de la variable P_{base} . Como ya se mencionó, se estimó para diferentes potencias picos empezando con una potencia pico o potencia máxima de 4.8 KW, intercalando hasta llegar a una potencia pico de 15 KW, para observar la tendencia que tiene los costos por consumo eléctrico en función de la potencia máxima de generación

Tabla 3.13: Resultados de costos anuales para caso 2 y 3

Pmax [Kw]	Caso		Diferencia [\$]
	Caso 2[\$/KwAño]	Caso 3 [\$ /KwAño]	
4,8	\$ 16.734,16	\$ 15.191,30	\$ 1.542,86
5	\$ 15.795,01	\$ 14.885,43	\$ 909,58
5,5	\$ 15.301,17	\$ 14.110,54	\$ 1.190,63
6	\$ 15.069,03	\$ 13.345,50	\$ 1.723,53
7	\$ 14.037,90	\$ 11.904,48	\$ 2.133,43
8	\$ 13.619,25	\$ 10.723,34	\$ 2.895,91
10	\$ 12.999,11	\$ 9.229,39	\$ 3.769,72
13	\$ 12.144,28	\$ 7.014,21	\$ 5.130,08
15	\$ 11.574,54	\$ 5.633,41	\$ 5.941,11

Se procedió a ingresar cada conjunto de datos para analizar en el código del software para el caso 2 y 3 para obtener los precios por consumos eléctrico diario y se procedió a llevarlos a costos anuales y los resultados se presenta en la Tabla 3.13, después se procedió a graficar en Matlab, las potencias máximas de generación versus el costo anual por consumo eléctrico, de los tres casos, considerando que el caso 1, no varía el costo para cada potencia máxima de generación. En la tabla como ya se ha mencionado los precios en cada caso tiende a reducir en función que se aumenta la potencia pico, pero las disminuciones de los precios son más significativas en el caso 3, como se indica a continuación en la figura 3.5.

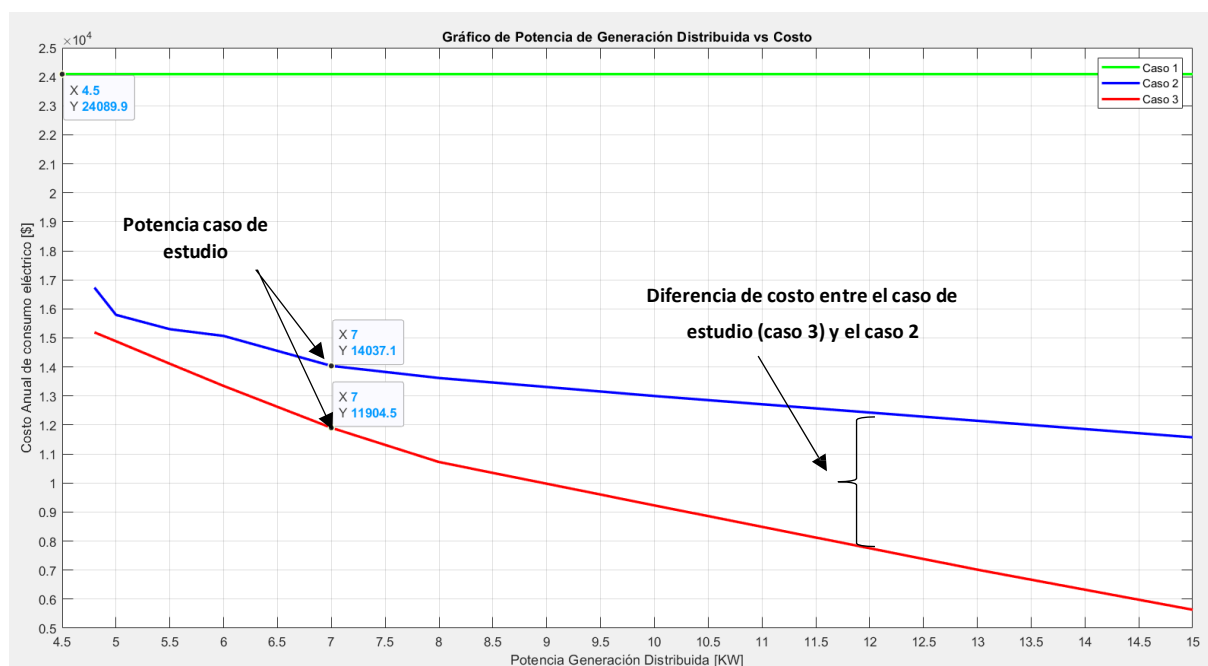


Figura 3.5: Grafico de potencia máxima de GD versus costo anual por consumo eléctrico

Para el caso 1 (línea color verde), como se mencionó anteriormente, este no tiende a variar, pero cabe mencionar que son valores promedios, para los tres casos.

Para el caso 2 (línea color celeste), se puede observar que es una línea exponencial decreciente continua, además, se observa que el precio decrece, pero no tiene mucha diferencia respecto a un punto anterior de PGD, pero se observa una gran diferencia respecto al caso 1.

Para el caso de estudio 3 (línea roja), se hace referencia donde está ubicado la potencia pico de PGD para realizar el proyecto. Para este caso, también tenemos una curva exponencial decreciente continua, pero en comparación con el caso 2, esta tiene a decrecer más rápido, esto lo podemos asociar a que hay mayor energía almacenada en las baterías, por ende, cubre más horas de demanda, y esto es más notorio conforme aumenta la potencia pico de PGD y es reflejando en un menor costo en el pago por consumo eléctrico anual. Podemos observar que conforme aumenta la potencia pico de PGD la diferencia entre el caso 3 y caso 2 va en aumento, y también se aprecia la diferencia que existe al compáralo con el caso 1.

3.8. Costo de proyecto

A continuación (Tabla 3.14), se detalla el precio de adquisición de los softwares necesarios para llevar a cabo el proyecto, estos programas son necesarios puesto que permiten analizar los parámetros que intervienen en el estudio fotovoltaico y permite tener los resultados más idóneos para la implementación del proyecto.

Tabla 3.14: *Precio de licencia de software*

Software	Características	Precio [\$/año]
AMPL	Individual	\$ 3.000,00
	Un proceso	\$ 4.500,00
	Multiprocesos	\$ 7.000,00
Notepad +++	Gratuito	\$ -
SunnyDising		\$ 600,00

A continuación, se desglosa el estudio de eficiencia energética y costo en diferentes etapas del proyecto, para tener en cuenta el costo total del proyecto.

Tabla 3.15: *Valores de diferentes ítems de estudio*

Item	Cantidad de personas	Detalles	Precio [\$]
Visita técnica	2	Identificación del sitio del proyecto	\$ 100,00
Estudio de demanda de potencia	2	Estudio de las cargas instaladas en la residencia, planos eléctricos.	\$ 300,00
Estudio de integración fotovoltaica	2	Estudio para determinar la potencia de la generación distribuida usando Software.	\$ 300,00
Uso de Software	1	Incluye el uso de todos los Software	\$ 500,00
Total			\$ 1.200,00

4. Capítulo 4

4.1. Conclusiones y recomendaciones

4.1.1. Conclusiones

Una vez terminada las fases necesarias para llevar a cabo nuestro proyecto se obtiene las siguientes conclusiones:

- El estudio realizado concluyo que la implementación de un sistema de gestión de demanda energética residencial con generación distribuida es fundamental para reducir costos. Los resultados del proyecto demuestran que un manejo adecuado de la energía, mediante software de optimización, permite disminuir pérdidas energéticas y priorizar el uso de fuentes de generación distribuida.
- Una vez analizado los diferentes casos de estudio, se puede también concluir que existen factores que contribuyen a las pérdidas de energía que no pueden ser optimizadas por el software o no pueden ser analizadas o consideradas, tales como los puntos calientes, mal dimensionamiento de conductores, equipos en mal estado, orientación de los paneles solares, etc.
- Durante el desarrollo de esta tesis se utilizó un software de optimización llamado AMPL que usa el Solver CPLEX y permite la integración de varios entes como baterías y generación fotovoltaicos, teniendo en cuenta restricciones propias del equipo para un óptimo flujo, las cuales minimizan las pérdidas y priorizan el uso de suministro de energía por parte de los paneles fotovoltaico.
- Se concluye en base al análisis de diferentes escenarios de potencia de generación distribuida, para el caso tres que, mientras se aumenta la potencia pico de generación distribuida, se puede almacenar más energía en las baterías la cual puede ser utilizada en las horas bajas de generación y ausencia de energía proveniente de la red de distribución; pero esto implica una mayor inversión en tema de baterías.
- Se analizo diferentes casos de generación distribuida y se concluyó que una estrategia para reducir perdidas y mejorar la eficiencia eléctrica, es el aumento de la capacidad del banco de baterías para que el excedente de energía generada pueda ser almacenada correctamente.

4.1.2. Recomendaciones

Después de realizar el proyecto y culminar con lo propuesto, se ha obtenidos ciertas observaciones modificar las variables de estudio y se ha obtenido las siguientes recomendaciones:

- En el código AMPL, se recomienda tener en cuenta los límites de las variables correspondiente al almacenador de baterías si se piensa aumentar la potencia pico de generación distribuida, caso contrario dará valores erróneos como resultados debido a que el código no administra ese exceso de energía de generación distribuida.
- Se recomienda que, antes de hacer la implementación del algoritmo en AMPL, realizar una segregación de cargas para determinar las más esenciales del sistema que se deban priorizar.
- Se recomienda como extensión del proyecto considerar la entrega de energía a la red pública, para mitigar la falta de energía debido a los tiempos de sequías, aplicable tanto para el caso 2 en el cual, el exceso de energía por parte de la generación distribuida enviara a la red de distribución y en el caso 3, el exceso de energía que no es almacenada por las baterías es enviada a la red de distribución.
- Se recomienda usar como extensión del proyecto considerando que se tiene un vehículo eléctrico o varios vehículos eléctricos y estos pueden ser utilizados como baterías que inyecta energía a las cargas.
- Se recomienda que, al momento de implementar el código, las fuentes de energía pueden provenir de otro tipo de generación, como puede ser los generadores eléctricos, que tendrán como restricciones horas de funcionamiento, duración y costo de combustible.
- Los valores de producción de energía fotovoltaica en horas luz, se recomienda que deben basarse en datos históricos recopilados mínimo 1 año, debió a que; si es de menos tiempo, no tienden a ser valores aproximados a la realidad.
- Se recomienda que, al momento de la implementación de código, analizar la tarifa de costo eléctrico, debido a que varía en función de la potencia consumida.

5. Referencias

- [1] A. L. C. M. A. G. R. O. A. J. L. A. Ing. A. D. Sandoya, Normas Ecuatorianas de la contruccion - Instalaciones Electricas, 2018.
- [2] B. J. R. C. y. F. E. J. L. F. Grisales, «Ubicación y dimensionamiento de generación distribuida: Una revisión,» *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, nº 2, pp. 157-176, 2017.
- [3] T. A. e. al., «Distributed generation: a definition,» *Electric Power Systems*, vol. 57, pp. 195-204, 2001.
- [4] T. Ackermann, «International Conference on Large Electric Systems [CIGRE],» [En línea]. Available: <http://www.cigre.org/Technical-activities/>.
- [5] A. R. Jordehi, «Allocation of distributed generation units in electric power systems: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 893-905, 2016.
- [6] M. I. B. A. P. V. Vega-Garita, «Techno-economic analysis of photovoltaic systems with energy storage for customers with a residential tarif in Costa Rica,» *Ingenieria - Universidad de costa Rica*, vol. 33, nº 2, pp. 14-41, Julio 2023.
- [7] T. G. J. O. F. A. M. R. Marcos, «Uso de tecnología solar en unidades de producción agropecuaria de la Región Huetar Norte de Costa Rica,» Noviembre 2016.
- [8] J. C. Repetto Paredes, 2024. [En línea]. Available: <https://repositorio.upse.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/46000/12248/UPSE-MEA-2024-0010.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

6. Anexos

Plano residencial para caso de estudio

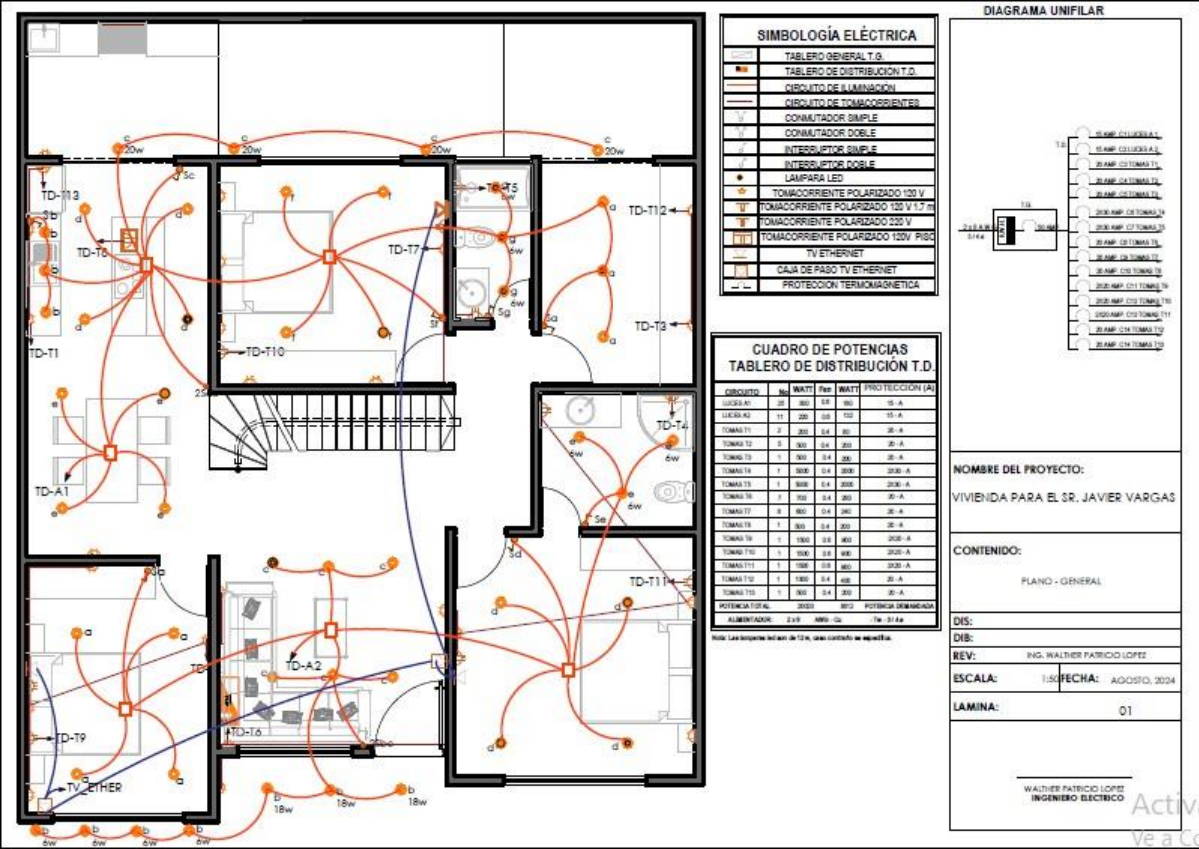


Figura 6.1: Plano residencial detallado los circuitos