



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**SISTEMA DE AHORRO ENERGÉTICO PARA UNA VIVIENDA UTILIZANDO
INTERNET DE LAS COSAS EN UN ENTORNO INTELIGENTE**

AUTOR

LUIS ENRIQUE VALVERDE CANGA

DOCENTE TUTOR

ING. MANUEL ASDRUAL MONTAÑO MSC.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2023

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la entereza necesaria para no claudicar en esta etapa tan plena del conocimiento y bendecir a todas las personas que han estado a mi alrededor brindándome su valioso apoyo.

A mi madre Normandis Canga, por siempre inculcarme buenos valores hasta el día de hoy, por tener la paciencia y la entrega para permitirme llegar hasta etapa final de mi carrera. Gracias por tus consejos y por ser el bálsamo que alivia las preocupaciones de todos tus hijos. Si estoy aquí hoy, es por ti madre. Gracias.

A mi padre José Valverde, por hacerme interesar en la música y en la búsqueda del conocimiento. Gracias por brindarme tus conocimientos, tus intereses y por moldearme como un hombre de bien que cuida y ve por su familia. Siempre serás mi modelo a seguir. Te amo padre.

A mis hermanos José Antonio y Mayra Montalvo, gracias por sus consejos, compañía y cariño que me han impulsado a conseguir este tan anhelado logro en mi vida profesional. Hermanos, gracias por sentirse orgullosos por quién soy y en quién me he convertido. Esto es por ustedes.

A mi esposa Nathaly Prado y a mi hijo Sebastián Valverde, que con su inconmensurable amor y entrega me han dado el mayor motivo para pensar en el futuro. Sus sacrificios han dado el mayor de los frutos y hoy este logro, es resultado del esfuerzo y empeño que los tres hemos puesto para poder llegar a este peldaño de nuestras vidas con la mayor gratificación. Los amo.

A mis amigos y compañeros, que siempre han estado prestos a escucharme y darme consejos idóneos. En especial a Byron Suntaxi, que, gracias a sus observaciones y apoyo, hoy puedo apropiarme e identificarme con este tema de tesis.

A todos mis docentes y a mi asesor de tesis Ing. Manuel Montaña, mis más sinceros agradecimientos.

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de titulación a mis padres. Con el mayor gesto de abnegación, esfuerzo y entrega han dedicado su amor para formarme como una persona de bien. Todos los resultados y metas que he alcanzado y alcanzaré son y serán gracias a ustedes, agradezco a Dios por que ustedes sean mis padres. A mi hermano José Antonio, gracias por darme el empuje y el cariño necesario para no rendirme en el bello camino del conocimiento, querido hermano lo he logrado.

A mi esposa Nathaly Prado, gracias por siempre escucharme, por entenderme, por tu gran amor constante, implacable y cálido. Este es un logro que ambos hemos obtenido. Te amo hoy, mañana y siempre.

A mi hijo Sebastián Enrique, a quién le dedico la siguiente cita que aprendí de mi padre y que siempre en momentos de flaqueza me animan a dar el máximo esfuerzo. Hijo, lleva esta cita grabada en tu alma y siempre da lo mejor de ti que tus padres siempre estaremos para ti, orgullosos de ti; *“No te des por vencido, ni aun vencido, no te sientas esclavo, ni aún esclavo; trémulo de pavor, piénsate bravo y arremete feroz ya mal herido. Ten el tesón de un clavo enmohecido, que ya viejo y ruin vuelve a ser clavo; no la cobarde intrepidez del pavo que amaina su plumaje al primer ruido. Procede como Dios que nunca llora; o como Lucifer que nunca reza: o como el robledal, cuya grandeza necesita del agua y no la implora. ¡Qué muerda y vocifere vengadora, ya rodando en el polvo, tu cabeza!”* Siempre adelante amado hijo mío.

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del trabajo de titulación denominado: **“Sistema de ahorro energético para una vivienda utilizando internet de las cosas en un entorno inteligente”**, elaborado por el estudiante Valverde Canga Luis Enrique de la carrera de Electrónica y Automatización de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes y autorizo al estudiante para que inicie los trámites legales correspondientes.

La Libertad, 4 de agosto del 2023



Ing. Manuel Montaña Asdrual, M.Sc.

Docente Tutor

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR



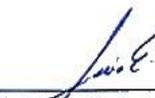
Ing. Ronald Rovira Jurado, Ph.D.
DIRECTOR DE LA CARRERA DE
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN



Ing. Washington Torres Guin, Mgt.
DOCENTE ESPECIALISTA



Ing. Manuel Montaña Blacio, Mgt.
DOCENTE TUTOR



Ing. Luis Chuquimarca Jiménez, Mgt.
DOCENTE GUIA UIC



Ing. Corina Gonzabay, Mgt.
SECRETARIA DE LA CARRERA DE
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

RESUMEN

El crecimiento poblacional actual desafía la distribución eléctrica debido al aumento de la demanda y el riesgo de sobrecarga en la red. La adopción de Smart Grids o Redes Inteligentes basadas en IoT en hogares redefine la comunicación y la domótica, ofreciendo beneficios tanto a los usuarios como a los proveedores de energía. Estos sistemas permiten una comunicación en tiempo real sobre el estado de la red y el consumo, además del monitoreo de sistemas de baja tensión y la gestión del consumo.

El presente trabajo de titulación aborda el diseño de un sistema de monitoreo y control de consumo de energía eléctrica para abonados residenciales, basado en IoT para reducir el consumo energético y obtener un beneficio económico tras el control de las cargas dentro del hogar. El sistema está conformado por una Unidad de Microcontrolador (MCU, por sus siglas en inglés) Node MCU ESP32 Dev Kit-1 encargada del monitoreo y cálculo de la corriente y potencia de las cargas trasladables, un convertidor analógico digital ADS1115 de alta resolución con ganancia programable, un sensor de corriente SCT013-30 para la medición de la corriente consumida por las cargas y relés para la ejecución de las acciones de control sobre las cargas. Además, se emplea el uso de la arquitectura TCP/IP para la comunicación WiFi de los módulos con el bróker ThingSpeak que funciona como nodo concentrador en la topología estrella extendida.

Para la optimización energética del sistema se emplea la regla de Pareto para determinar las cargas representativas dentro del sistema y se aplica una función objetivo para minimizar el consumo energético y por ende el valor económico generado por el consumo. Se emplea una restricción de funcionamiento dentro de una franja horaria establecida en base a programación horaria que contribuye con el medio ambiente y la red de distribución eléctrica.

Palabras clave: *ESP32, IoT, ahorro energético, regla de Pareto, comunicación Wifi, ThingSpeak, programación horaria.*

ABSTRACT

The current population growth poses a significant challenge to electrical distribution due to increased demand and the risk of network overload. The adoption of Smart Grids or IoT-based Smart Grids in households redefines communication and home automation, offering benefits to both users and energy providers. These systems enable real-time communication about network status and consumption, in addition to monitoring low-voltage systems and managing consumption.

This thesis addresses the design of an energy consumption monitoring and control system for residential subscribers, based on IoT, to reduce energy consumption and achieve economic benefits through load management within the home. The system comprises a Node MCU ESP32 Dev Kit-1 Microcontroller Unit (MCU) responsible for monitoring and calculating current and power of transferable loads, a high-resolution programmable gain analog-to-digital converter ADS1115, a SCT013-30 current sensor for load current measurement, and relays for load control actions. Additionally, the TCP/IP architecture is employed for WiFi communication of the modules with the ThingSpeak broker, which functions as a concentrator node in the extended star topology.

For energy optimization, the Pareto rule is utilized to identify representative loads within the system, and an objective function is applied to minimize energy consumption and the associated economic value generated by consumption. Operating constraints are imposed within a predefined time window based on scheduling, contributing to environmental sustainability and the electrical distribution network.

Keywords: ESP32, IoT, energy savings, Pareto rule, WiFi communication, ThingSpeak, scheduling.

Índice General

RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
ÍNDICE GENERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XII
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	2
1.1 ANTECEDENTES	2
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.	4
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	5
1.4 JUSTIFICACIÓN.	5
1.5 METODOLOGÍA.	7
CAPITULO II.....	9
2.1 MARCO CONTEXTUAL.....	9
2.2 MARCO CONCEPTUAL.....	10
2.3 MARCO TEÓRICO	38
CAPITULO III	38
3.1 HARDWARE DEL SISTEMA	40
3.2 SOFTWARE DEL SISTEMA	50
3.3 DISEÑO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA	52
3.4 ARQUITECTURA DE LA RED	55
3.5 CREACIÓN DEL CANAL EN THINGSPEAK	57
3.6 INSTALACIÓN DE ARDUINO IDE	60
3.7 DESARROLLO DEL MÓDULO DE MEDICIÓN Y MONITOREO.....	62
3.8 PROGRAMACIÓN DE LOS MÓDULOS PARA EL ENVÍO DE POTENCIA Y CORRIENTE DE LOS EQUIPOS.	74
3.9 PRESUPUESTO DE LA PROPUESTA.	77
3.10 TRATAMIENTO DE DATOS EN MATLAB.....	78

3.11 OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA POR PROGRAMACIÓN HORARIA BASADA EN LA REGLA DE PARETO	82
CAPITULO IV	88
4.1 RESULTADOS DEL DISEÑO DE LOS MÓDULOS DE MONITOREO Y CONTROL	88
4.2 RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE CORRIENTE POR MEDIO DE LA CALIBRACIÓN DEL SENSOR SCT013-30.....	90
4.3 RESULTADOS DE LA CORRIENTE Y POTENCIA ENVIADA HACIA EL BRÓKER	92
4.4 RESULTADOS DE LA INTERPOLACIÓN DE LOS DATOS FALTANTES	94
4.5 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL CÁLCULO DE LA ENERGÍA CONSUMIDA.....	98
4.6 RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN POR PROGRAMACIÓN DE FRANJA HORARIA Y CONTROL DE PRESENCIA	100
4.7 RESULTADOS DEL PRECIO DE LA ENERGÍA CONSUMIDA TRAS LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA.....	111
4.8 PRONÓSTICO DE CONSUMO.....	115
CAPITULO V	119
5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	119
BIBLIOGRAFÍA.....	122

Índice de Figuras

Figura 1. Diseño del sistema de monitoreo y control.....	4
Figura 2. Provincias con mayor consumo frente a la provincia de Santa Elena.	7
Figura 3. Esquema de distribución del sistema eléctrico.	11
Figura 4. Conexión de elementos de control y cargas.....	12
Figura 5. Funcionamiento de una ducha eléctrica.	13
Figura 6. Etiqueta de eficiencia energética en electrodomésticos.....	17
Figura 7. Niveles de la automatización.	18
Figura 8. Pasos para la Digitalización de un sistema.	21
Figura 9. Esquema de un sensor.....	22
Figura 10. Red inalámbrica de sensores y actuadores IoT.	23
Figura 11. Arquitectura para redes WSN y LR-WPAN propuesto por el estándar IEEE 802.15.4	24
Figura 12. Arquitectura Edge y Remote de Macchina.io	30
Figura 13. Dispositivos modulares Thinking Things de Telefónica.	32
Figura 14. Arquitectura del protocolo MQTT.....	34
Figura 15. Arquitectura del protocolo DDS.	35
Figura 16. Arquitectura del protocolo AMQP.....	36
Figura 17. Topologías de red.....	38
Figura 18. Distribución de pines en la placa NodeMCU ESP32 DevKit-1.....	41
Figura 19. Identificación de pines del convertidor ADS1115.....	44
Figura 20. Identificación de los pines y bornes del módulo de relé.	46
Figura 21. Identificación del Sensor SCT013-030.....	47
Figura 22. Vista de la fuente HLK-PM01.	48
Figura 23. Sensor HC-SR501.....	49
Figura 24. Vista de la ventana principal del canal “Hogar” creado en ThingSpeak.	51
Figura 25. Disposición de las cargas de interés dentro del escenario de estudio.	54
Figura 26. Modelo 3D del escenario de estudio.....	55
Figura 27. Arquitectura de Red implementada en el sistema de monitoreo.....	56
Figura 28. Campos en blanco para la creación de una cuenta en MathWorks.....	58
Figura 29. Entorno de inicio en ThingSpeak	58
Figura 30. Configuraciones de los campos en ThingSpeak	59
Figura 31. Llave de escritura y lectura para el canal de Corriente en ThingSpeak.....	60

Figura 32. Adición del gestor de tarjetas ESP32 para Arduino IDE.....	61
Figura 33. Diagrama de bloques para la alimentación de los componentes dentro de cada módulo.....	63
Figura 34. Alimentación de los componentes con un filtro de picos.	63
Figura 35. Esquemático del circuito electrónico de los módulos de monitoreo.....	64
Figura 36. Esquemático del circuito electrónico de los módulos de monitoreo y diseño PCB.....	65
Figura 37. Diagrama de flujo simplificado para la obtención de corriente y potencia.	66
Figura 38. Algoritmo para la medición de corriente del sensor SCT013-30.	67
Figura 39. Correspondencia del valor de corriente obtenido por medio de la pinza amperimétrica y su comparación con el valor obtenido por el sensor SCT013-30.....	68
Figura 40. Curva correspondiente a los valores de corriente medida.....	70
Figura 41. Cálculo del valor económico relacionado con la energía eléctrica consumida.	73
Figura 42. Diagrama de verificación del envío de los datos hacia el bróker.....	74
Figura 43. Diagrama de flujo para la programación montada sobre la tarjeta ESP32. .	77
Figura 44. Identificación de los datos exportados y búsqueda de los valores no NAN.	79
Figura 45. Identificación de los datos exportados y búsqueda de los valores no NAN.	81
Figura 46. Diagrama de correspondencia de Pareto para el perfil de la energía de consumo por los equipos de interés y los demás electrodomésticos de la vivienda.....	83
Figura 47. Diagrama de flujo para la programación de medición y programación horaria montada sobre la tarjeta ESP32.....	87
Figura 48. Módulos de monitoreo y control para las cargas de interés dentro de la vivienda.	89
Figura 49. Detección de presencia por medio del sensor PIR y encendido de las cargas por medio de relés de un canal.	90
Figura 50. Curva de ajuste para la calibración de las mediciones.....	91
Figura 51. Comportamiento de la corriente generada en Matlab.	94
Figura 52. Gráfica de los valores interpolados a la derecha y su comparativa.	97
Figura 53. Comportamiento de la potencia de las cargas trasladables y del tablero de distribución.	98
Figura 54. Energía consumida del sistema, en el periodo medido.	99
Figura 55. Energía consumida del sistema, medida en 24 horas.....	100
Figura 56. Operación de las cargas trasladables dentro de la franja horaria.	101

Figura 57. Operación de las cargas trasladables dentro de la franja horaria.	103
Figura 58. Consumo de potencia en el segundo escenario de validación.	103
Figura 59. Consumo de energía de las cargas de interés en el escenario 2.	105
Figura 60. Consumo de energía del circuito de iluminación.....	106
Figura 61. Resultado de la reducción del consumo de energía en base a la optimización de franja horaria.....	109
Figura 62. Resultado de la reducción del consumo de energía en base a la optimización de franja horaria en el segundo escenario.....	111
Figura 63. Resultado económico en base a la optimización por franja horaria.....	113
Figura 64. Resultado económico en base a la optimización por franja horaria en el escenario 2.....	115
Figura 65. Proyección de la energía acumulada consumida por la vivienda cuando no se tiene programación de franja horaria.....	116
Figura 66. Proyección de la energía acumulada consumida por la vivienda por control de franja horaria.....	117

Índice de Tablas

Tabla 1. Valor del kilovatio-hora según la categoría tarifaria.	15
Tabla 2. Precios mensuales por los datos medidos en Azure IoT Hub.....	27
Tabla 3. Valores de trabajo en la plataforma Carriots de Altair.	29
Tabla 4. Valores de las licencias ofrecidas por ThingSpeak.	31
Tabla 5. Características técnicas del NodeMCU ESP32.	42
Tabla 6. Características técnicas del ADS115.	45
Tabla 7. Características técnicas del relé JQC-3FF-S-Z.....	45
Tabla 8. Características del sensor SCT013-030.	47
Tabla 9. Características de la fuente HLK-PM01.....	48
Tabla 10. Características del sensor PIR HC-SR501.	49
Tabla 11. Identificación de las cargas conectadas a cada fase.	52
Tabla 12. Redistribución de las cargas entorno a una sola fase.....	53
Tabla 13. Identificación de las cargas optimizables.	54
Tabla 14. Actividades y rutinas generadas en Arduino IDE sobre la interfaz TCP/IP..	57
Tabla 15. Librerías empleadas en Arduino IDE.	62
Tabla 16. Rango de medición y margen de exactitud del amperímetro H33054.	68
Tabla 17. Mediciones de corriente del sensor SCT013-30 comparadas con sus respectivos valores medidos a través del equipo H33054 en la misma carga.	69
Tabla 18. Valor económico de los dispositivos necesarios para el proyecto.....	78
Tabla 19. Error absoluto entre las mediciones interpoladas del SCT013-30 y las mediciones reales obtenidas de la pinza amperimétrica.	92
Tabla 20. Datos exportados desde el bróker con celdas vacías.	94
Tabla 21. Resultado de los datos interpolados en Matlab.	95

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto tiene como objetivo principal generar un ahorro energético en sistemas eléctricos domiciliarios de modo que se evidencie la disminución de la energía eléctrica del abonado. Por tanto, se emplea el desarrollo de una Smart Grid que pueda gestionar de manera remota las cargas conectadas a la red del abonado, mediante la interconexión de dispositivos basados en IoT (Internet de las Cosas, por sus siglas en inglés), en base a un algoritmo de optimización.

La componente técnica del proyecto será desarrollada en 4 etapas, las cuales se detallan a continuación.

La primera etapa corresponde al estudio del consumo que presenta la residencia contemplando las cargas dispuestas en la red, para lo cual, será necesario realizar un levantamiento de información sobre la potencia instalada en el domicilio haciendo especial énfasis en las características específicas de cada carga.

Durante la segunda etapa se tiene la selección, configuración e instalación de los sensores, actuadores, redes de comunicación y bases de datos basadas en IoT. En esta etapa, se incluye el desarrollo de circuitos PCB (*Printed Circuit Board*, por sus siglas en inglés) así como la programación de las tarjetas de comunicación y el desarrollo tanto de la base de datos como la programación para las tarjetas de control, la configuración de los sensores y comunicaciones inalámbricas.

Cabe mencionar que para la estimación del valor del consumo generado por el hogar se tendrá en cuenta el método aritmético utilizado por la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR).

Para la tercera etapa se tiene la ejecución de un algoritmo de optimización orientado al ahorro energético. Finalmente, para la cuarta y última etapa se tiene la realización de los ensayos y calibración del sistema de ahorro energético generado, así como el contraste del ahorro obtenido frente al consumo que se obtuvo durante la primera etapa.

CAPITULO I

1.1 Antecedentes

El crecimiento poblacional vigente supone un gran reto para el sistema de distribución eléctrica actual debido al aumento de la demanda y la posible sobrecarga de la red. La aplicación de una Smart Grid o Red Inteligente en el hogar basada en IoT supone un nuevo paradigma de la comunicación y la domótica. Un hogar que cuente con estos sistemas presenta beneficios tanto para el usuario, como por ejemplo la comunicación en tiempo real del estado de su red y consumo, como al proveedor del servicio eléctrico en el monitoreo del sistema de baja tensión permitiendo determinar el estado de la red eléctrica de un abonado, en particular, y establecer su consumo [1].

En [2], se presentó un medidor inteligente prepago basado en internet que permite al usuario conocer en tiempo real el estado del consumo de su red domiciliaria y tomar acciones de control ON/OFF, todo esto mediante una unidad de medición de potencia PMU (Power Measuring Unit, por sus siglas en inglés), una unidad de procesamiento PU (Processing Unit), una unidad de interfaz (Interface Unit) y comunicación con un servidor web de base de datos. Se incluye, además, la visualización de los datos obtenidos en un aplicativo móvil que tiene la posibilidad de realizar el control de conexión o desconexión de las cargas.

El monitoreo de la energía de cargas domésticas propuesto por [3], basa su aplicación en el control ON/OFF mediante un medidor inteligente que registra variables como voltaje y corriente para obtener la potencia consumida en tiempo real que será enviada a un servidor de IOT que envía los datos a una aplicación móvil para realizar el proceso de control. Se presenta la versatilidad del sistema al permitir realizar la programación de horarios de control para cargas especiales y evitar que estas se activen al mismo tiempo con el fin de reducir el consumo eléctrico de la red domiciliaria.

Una red inteligente es capaz de gestionar y distribuir la electricidad de forma eficiente, económica y segura integrando tecnologías y elementos de bajo costo que permiten la detección, comunicación, control y transmisión de variables como voltaje, corriente o factor de potencia. La existencia de una gran diversidad de módulos de comunicación wifi de bajo costo y fácil implementación, como Arduino, Raspberry o

NodeMCU y sensores de corriente y voltaje con comunicación wifi permiten la aplicación de la tecnología IoT en un entorno automático orientado al hogar.

En [4], se implementó un medidor de energía compacto basado en IOT mediante el uso de módulos de comunicación wifi como Raspberry, unidad de microcontrolador (MCU) ESP32 y sensor PZEM-004T conectado con un módulo de wifi, que se comunican entre ellos mediante MQTT. Raspberry funciona como un servidor local que recepta las mediciones del MCU y el PZEM-004T, convierte los valores a potencia, programa la tarifa de consumo y envía estos datos a la nube IOT y al usuario el costo del kilovatio/hora (KW/h) mediante una aplicación móvil.

Por otra parte, en [5] se generó una red inteligente compuesta de tres secciones: flujo de energía bidireccional, medición inteligente de energía y sistema de automatización del hogar para un PV-Array (sistema solar fotovoltaico). La implementación del módulo de pruebas estuvo compuesta de sensores de corriente y voltaje de bajo costo, que miden constantemente el flujo de potencia entregado por el PV-Array y el hogar permitiendo gestionar el control de conexión o desconexión de las cargas del hogar. Los datos obtenidos son enviados por medio de un módulo GSM, al usuario, sin embargo, no se dota al usuario de un control a distancia para el gestionamiento de las cargas.

El desarrollo de un sistema IOT orientado al monitoreo del consumo eléctrico de equipos de mayor consumo en un hogar propuesto por [6], fue generado por sensores no invasivos de corriente y sensores de voltaje que se comunican a un MCU ESP32 para el envío de los datos a la nube y que esta se comunique con el usuario para un posterior control de las cargas. Además, se contempla el caso de un apagón o corte de suministro eléctrico mediante el soporte de una batería que sustente al sistema desarrollado.

Contar con un sistema de monitoreo inteligente de consumo eléctrico en un hogar, representa beneficios tanto al usuario como a la red de distribución. La implementación del sistema, basado en IoT, permite al usuario final gestionar de manera remota, a través de una interfaz web o aplicativo móvil, las cargas conectadas a su red proporcionando al hogar un sistema de seguridad para sus electrodomésticos y por consecuencia se obtiene un ahorro económico y energético [7].

1.2 Descripción del Proyecto.

El proceso de medición será llevado a cabo por medio del sensor de corriente SCT013-30 que medirá el valor de corriente de consumo de las cargas específicas. La señal de salida del sensor SCT es de $\pm 1 V$ por lo cual se necesitará de un convertidor analógico a digital de alta resolución para evitar la pérdida de mediciones.

A su vez, el SCT013 estará conectado al convertidor analógico a digital (ADC, por sus siglas en inglés) ADS1115 que es un convertidor ADC de alta precisión con una resolución de 16 bits. El ADC está conectado al NodeMCU ESP32 Dev Kit 1 mediante comunicación I2C con las señales SDA y SCL, para enviar los datos mediante protocolo HTTP a un servidor web para que sean almacenados en una base de datos de ThingSpeak, que es una plataforma IoT y funcionará como el bróker del sistema de monitoreo.

Posteriormente, se desarrollará un algoritmo de optimización orientado a minimizar el consumo energético residencial, en relación con estrategias de ahorro. Para ello se programará el ESP32 para que además del monitoreo de la corriente, ejecute acciones de control programadas mediante la conmutación relés que enciendan o apaguen las cargas conectadas a ellos.

A continuación, en la figura 1, se presenta el diagrama del sistema de hardware que funcionará en el proceso de lectura de valores y envío, así como el control por accionamiento de relés.

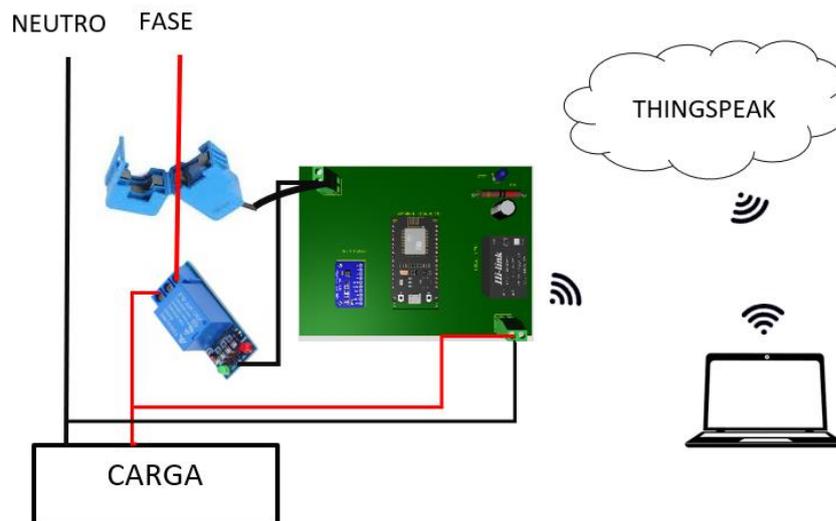


Figura 1. Diseño del sistema de monitoreo y control.

Fuente: Elaborado por el autor.

1.3 Objetivos del proyecto.

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de monitoreo y control de la energía consumida en una vivienda, mediante el uso de sensores y base de datos IoT que generen un ahorro del consumo energético del usuario final.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar los diferentes protocolos de comunicación existentes para aplicaciones IoT, mediante la revisión de publicaciones referentes al tratamiento de envío y recepción de datos, con el fin de determinar la mejor estrategia de conectividad.
- Identificar algoritmos y técnicas aplicadas en la optimización de energía, haciendo énfasis en sus características relacionadas al ahorro energético residencial.
- Implementar los módulos de medición y comunicación, identificando características de las cargas conectadas a la red para determinar los valores de consumo en determinadas franjas horarias.
- Probar y validar el modelo de medición y algoritmo de optimización energética, mediante la generación de pruebas de ensayo con el fin de determinar el ahorro generado dentro de la red domiciliaria

1.4 Justificación.

Actualmente, el servicio eléctrico representa uno de los sectores de servicio público de mayor auge debido al crecimiento de la población. El desarrollo de las tareas cotidianas de la sociedad actual gira entorno al uso de la electricidad, y su presencia en los hogares se considera como un derecho proporcionado por el estado [8].

De igual forma, contar con un servicio de calidad representa un gran reto para el sector de generación eléctrica pues debe abastecer del servicio a una población en crecimiento. Dentro del marco de generación eléctrica se contempla la generación por medio de fuentes de energía renovable que si bien sustituye a la producción en base a recursos fósiles, también se enfrenta al gran reto del impacto ambiental y recuperación de la inversión económica generada para su implementación [9].

El consumo eficiente de la energía y el desarrollo sostenible del medio ambiente son los objetivos principales que buscan las tecnologías actuales que están orientadas a la eficiencia energética. Por ejemplo, al realizar un análisis regional de Ecuador (ver figura 2), en materia de consumo energético, se tiene que la región costa presenta mayor demanda energética, esto debido a las estaciones climáticas del medio que hacen que los abonados adquieran más equipos de frío para contrarrestar las temporadas calurosas. Así como existen electrodomésticos que presentan un mayor consumo de energía, también existen factores que no dependen de la carga en sí, sino más bien corresponden a factores propios del medio en el que se ven involucrados los consumidores finales. Factores como las estaciones climáticas, las dimensiones y características de la vivienda y el comportamiento humano inciden directamente en el incremento de carga conectada a la red domiciliaria. El alto consumo energético en hogares es producido mayormente por el comportamiento humano cuyos hábitos conducen a un desperdicio de la generación eléctrica, que genera a largo tiempo un desarrollo insostenible en materia ambiental [10].

Con el desarrollo actual de la tecnología se proponen sistemas inteligentes de gestión de energía que tendrán grandes impactos para el consumidor final. Por una parte está el ahorro económico en sus planillas de consumo y a mayor nivel está el sistema de distribución que al no ser sobrecargado por sus abonados puede trabajar de forma óptima [11].

Por tanto, la propuesta de una red inteligente que pueda gestionar el consumo de energía eléctrica en un hogar proporcionará un control óptimo de las cargas conectadas a la red local y como consecuencia de ello el consumidor final podrá comprobar su consumo con la finalidad de minimizar el valor económico de sus planillas mensuales mediante el control y distribución de la energía, cuyos resultados se traducen en una mejor administración de la energía proporcionada por la red y un alto impacto sobre la exigencia de esta.

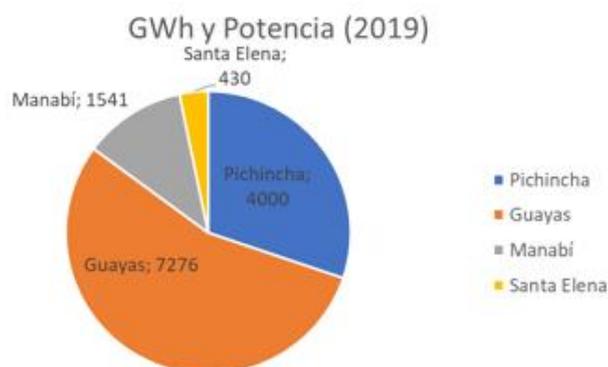


Figura 2. Provincias con mayor consumo frente a la provincia de Santa Elena.

Fuente: Elaborado por el autor.

1.5 Metodología.

La metodología según [12], consiste en una búsqueda sistemática y ordenada de información en base a procedimientos que permitan obtener nuevos conocimientos o actualizar los ya establecidos en determinada área en la que se está enfocando. Según lo expuesto se opta por una metodología exploratoria y proyectiva

1.5.1 Investigación Exploratoria

La investigación exploratoria se contempla como un tipo de investigación utilizada con el propósito de definir de manera más clara el problema y enfocarlo de tal forma que resulte de mayor comprensión para el investigador [13].

Así, se empleará el proceso de investigación exploratoria con la finalidad de definir de forma más clara los factores que inciden en el consumo energético, los problemas que surgen en el control de cargas y las características principales de un hogar que intervienen en un alto consumo de energía mensual.

1.5.2 Investigación Proyectiva

La investigación Proyectiva, según [14], tiene como objetivo el desarrollo de un modelo, propuesta o plan que permita la solución de un problema específico. Mientras que en [13], la define como una propuesta capaz de dar soluciones frente a un problema planteado, intentando generar soluciones a hipótesis sobre el futuro del tema en cuestión.

De esta manera, se opta por un tipo de investigación proyectiva con la finalidad de establecer, con fundamentos, las razones del diseño del modelo de ahorro energético, así como la elección de componentes basados en IoT y sus plataformas de desarrollo.

CAPITULO II

2.1 Marco Contextual

En Ecuador, la Corporación Nacional de Electricidad Empresa Pública (CNEL EP) es la encargada de proveer el servicio público de distribución y comercialización de electricidad que tiene como objetivo satisfacer la demanda eléctrica generada por los abonados regulados de cada unidad de negocio que conforma CNEL EP. Actualmente, CNEL EP está compuesta por 11 unidades de negocio que cubren todas las provincias que conforman el Ecuador, dentro de las cuales se considera la Unidad de Negocios Santa Elena [15]

Según [16], la Unidad de Negocios Santa Elena presentó en el año 2019, 126.104 clientes regulados de los cuales 113.905 corresponden al sector residencial. En el mismo año, la cobertura del servicio eléctrico en la provincia fue del 88.53% de la población con un consumo de 430 GWh [17].

Por otra parte, se tiene que el consumo per cápita en kilovatios/hora durante 2020 fue de 1.079,06, mientras que en 2021 fue de 1,133,160 kilovatios/hora debido al incremento de la cobertura del servicio eléctrico correspondiente al 90.27%. La disminución en el consumo per cápita de 2020 se debió a las medidas restrictivas generadas por la pandemia de Covid19 [18].

Debido al crecimiento de la cobertura del servicio eléctrico, durante los últimos años en Ecuador, más hogares e industrias cuentan con la posibilidad de conexiones a internet favoreciendo la aplicación de tecnologías de IoT. Sectores industriales como el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS), Petroamazonas y Produbanco cuentan con infraestructuras maduras para la implementación de IoT enfocadas a la telemetría. [19].

Por su parte, en la provincia de Santa Elena, el desarrollo de sistemas basados en IoT aplicados a la domótica va tomando fuerza. En [20], se muestra el desarrollo de un sistema automático para el control de luces y de un aire acondicionado además de proveer concepciones sobre tecnologías disponibles para domótica usando internet. Mientras que en [21], se presenta un sistema domótico para el control por medio de voz del encendido o apagado de luces y el control de ciertos electrodomésticos

diseñado específicamente para personas con dificultades motrices, convirtiendo su hogar en un entorno inteligente.

En suma, el incremento de hogares que cuentan con servicio eléctrico y la aplicación emergente de sistemas basados en IoT para domótica en Santa Elena, proyectan a la provincia a un aumento de aplicaciones para hogares inteligentes, dentro de las cuales se considera el desarrollo de sistemas automáticos orientados al ahorro energético, permitiendo al usuario el control del consumo de energía con la finalidad de disminuir el valor del coste mensual.

2.2 Marco Conceptual

2.2.1 Energía eléctrica

La energía eléctrica es una de las formas de energía de mayor demanda en la actualidad, su uso se extiende en todos los sectores industriales, artesanos, residenciales y hasta en medios de transporte y comunicación. Existen distintas formas de producir energía eléctrica tal como centrales hidroeléctricas, térmicas, nucleares, entre otras.

Este tipo de energía consiste en el movimiento de electrones, dentro de un circuito, cuando entre dos puntos existe una diferencia de potencial. Esta diferencia de potencial eléctrico produce una corriente eléctrica que representa al flujo de electrones que se desplazan por un conductor, hacia una carga (sea esta resistiva, inductiva o capacitiva) que transforma este tipo de energía en otra ya sea mecánica, lumínica, calor u otro [22].

Para producir energía eléctrica es necesario partir de la energía primaria, ésta consiste en la energía que se encuentra en el medio ambiente, tal como la energía potencial existente en un embalse artificial o natural, la energía geotérmica o la energía procedente del movimiento de las olas en el océano. La energía obtenida tras los procesos de transformación, transporte y distribución se conoce como energía final y es esta energía la destinada para el consumo de los usuarios finales, tal como se muestra en la figura 6. [23].

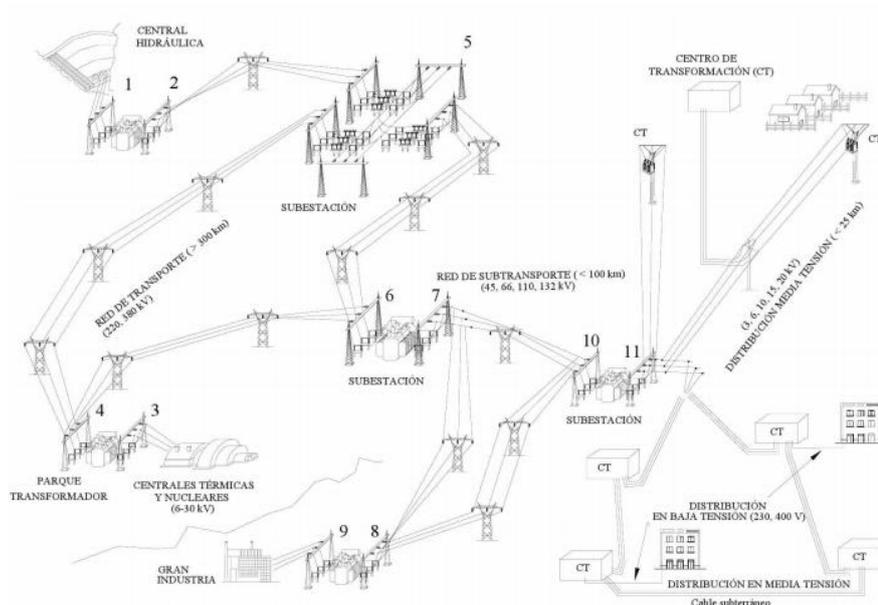


Figura 3. Esquema de distribución del sistema eléctrico.

Fuente: González, F. B. (2002). *Sistemas de energía eléctrica*

A diferencia de otros tipos de energía, la energía eléctrica y especialmente la energía de corriente alterna no puede ser almacenada para un posterior uso esto debido a su característica fluctuante en relación con el tiempo. Es por tal motivo que los sistemas de generación, transporte y distribución deben estar diseñados para una demanda creciente por ello dichos sistemas se diseñan bajo proyecciones que consideran intervalos de confianza para su crecimiento exponencial [23].

2.2.1.1 Sistemas eléctricos residenciales

Se considera un sistema eléctrico residencial al conjunto de aparamenta eléctrica de control o protección que, conexas entre sí, conforman circuitos capaces de transmitir la energía eléctrica a los distintos puntos o nodos de la instalación. Los sistemas eléctricos residenciales por lo general son monofásicos de 2 hilos (un conductor de fase y otro de neutro) o de 3 hilos (dos conductores de fase más un conductor de neutro) [24]. En la figura 4 se puede apreciar las canalizaciones implementadas para el paso de los cables conductores, así como las conexiones entre los diferentes elementos que forman parte de una instalación eléctrica.

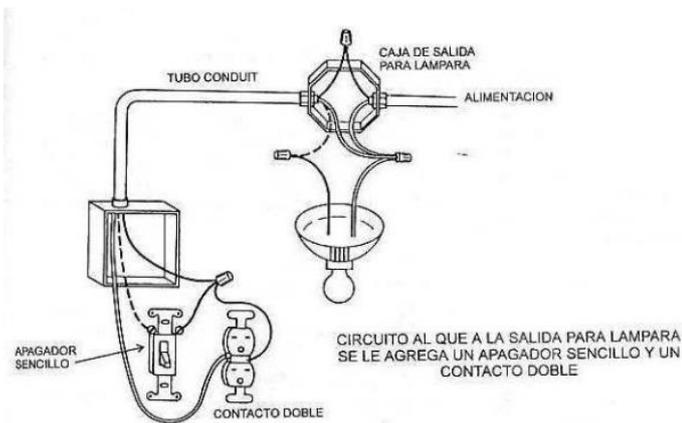


Figura 4. Conexión de elementos de control y cargas.

Fuente: Enríquez Harper, G. (2002). Guía para el diseño de instalaciones eléctricas residenciales, industriales y comerciales: basada en las normas técnicas para instalaciones eléctricas.

Las instalaciones eléctricas residenciales son aquellas configuraciones de distintos circuitos eléctricos (configuraciones: serie, paralelo o una combinación de ambos) que están compuestos por diversos elementos y que, generalmente, constan de 4 partes básicas:

- Fuente de energía (Ubicada en un panel de distribución).
- Conductores (Alambres de cobre que transportan la corriente).
- Cargas (Aquellos dispositivos que consumen energía y prestan un beneficio al usuario).
- Dispositivos de control (como disyuntores o interruptores).

El servicio eléctrico domiciliario llega a los hogares desde el tendido de baja tensión por medio de acometidas, hasta 600 voltios, que se conectan al medidor de energía y de este, al tablero de distribución principal del hogar.

Conforme al nivel de tensión solicitado por el cliente, las acometidas podrán ser provistas con dos o tres hilos según sea el caso. Las conexiones internas dentro del hogar son competencia exclusiva de los clientes siendo ellos los responsables del consumo generado, respetando los lineamientos exigidos por el proveedor del servicio [25]. Por tanto, toda instalación eléctrica residencial debe seguir la normativa vigente para instalaciones eléctricas domiciliarias con la finalidad de producir sistemas estandarizados que cumplan con los requisitos de seguridad.

2.2.1.2 Consumo Eléctrico

El consumo eléctrico puede entenderse como el producto entre la cantidad de energía eléctrica absorbida por equipos o aparatos domésticos y el tiempo en el que han permanecido activos consumiendo energía de la red. Este consumo generado por diversas cargas se traduce en la transformación de la energía eléctrica consumida a otro tipo de energía entregada, como por ejemplo una ducha eléctrica absorbe potencia eléctrica y emite calor sobre una resistencia que calienta el agua que circula por ella, tal como se muestra en la figura 5.

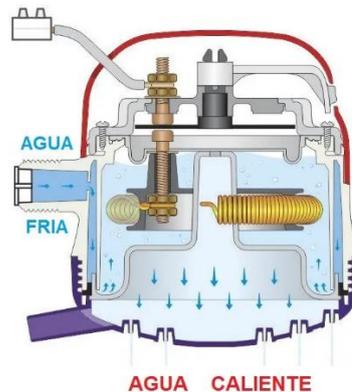


Figura 5. *Funcionamiento de una ducha eléctrica.*

Fuente: Recuperado de: <https://como-funciona.co/una-ducha-electrica/>.

El consumo de energía eléctrica se mide en Kilovatios-Hora (KWH), tal como se expresa en la ecuación 1:

$$\text{Energía consumida} = (Kw). (h). (\text{días}) \quad [1]$$

El consumo eléctrico dentro de un sistema es contabilizado a través de un medidor de energía que, generalmente, lo provee el distribuidor del sistema eléctrico con la finalidad de llevar un registro sobre el consumo de energía y potencia que genera un cliente. De acuerdo con el nivel de consumo propuesto en el diseño de un sistema eléctrico, se considera la instalación del nivel de voltaje y potencia requeridos y conforme a estos valores se establecen tarifas económicas respecto al consumo [25].

Dentro de un domicilio, el consumo eléctrico lo realizan elementos de bajo nivel de voltaje (120 voltios – 240 voltios) que pueden estar representados por:

- Luminarias.

- Electrodomésticos
- Bombas de agua.
- Sistemas de alarma y seguridad, entre otros.

2.2.1.3 Pliego Tarifario Eléctrico Ecuatoriano

El pliego tarifario eléctrico ecuatoriano es un documento desarrollado anualmente por la ARCERNNR [25], sujeto a normativas como la Constitución de la República y la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (SPEE), en el cual se establecen :

- Nivel tarifario.
- Estructura tarifaria.
- Facturación.
- Régimen tarifario.

Dentro de la categoría residencial se contemplan a los usuarios que requieren del servicio eléctrico para fines exclusivamente que competen al hogar independientemente del tamaño y para una pequeña actividad comercial o artesanal. La categoría general abarca los demás escenarios que dejan de ser entornos domiciliarios tal como: industria, comercio y prestación de servicios para el sector público o privado.

También proporciona, además, indicaciones de como calcular el consumo eléctrico tanto para la tarifa residencial como la comercial e industrial.

2.2.1.4 Franjas horarias de consumo

Dentro de la publicación del pliego tarifario eléctrico del año 2022, se determinan las franjas horarias donde se presenta un valor de consumo base, punta y medio. La categoría de tarifa residencial contempla exclusivamente el uso doméstico y pequeños comercios incorporados en la vivienda familiar, con un voltaje inferior a los 600 voltios [25].

Así, las franjas horarias se establecen dentro de los siguientes horarios:

- Consumo de Hora Media: entre las 8 am hasta las 6pm.
- Consumo de Hora Punta: entre las 6pm has las 10pm.
- Consumo de Hora Base: entre las 10pm hasta las 8am.

La categoría de tarifa residencial mantiene un valor fijo del kilovatio-hora. La aplicación de franjas horarias está en función de la tarifa aplicada y de forma general depende de la potencia contratada (resultante del estudio o proyecto eléctrico aprobado por la distribuidora) o que la demanda facturable, sea superior a 10 kW; y que dispongan de un registrador de demanda horaria que permita identificar la demanda de potencia y los consumos de energía en los períodos horarios de punta, media y base.

2.2.1.5 Precio del Kilovatio-Hora

La ARCERNNR es la encargada de fijar los valores por concepto de kilovatio-hora de consumo, tanto para la tarifa residencial como la general. En la tabla 1 se resume el valor del kilovatio-hora por nivel de consumo de energía y por categoría de tarifa y considerando de todos los valores de consumo expuestos en [25],se obtiene:

Tabla 1. Valor del kilovatio-hora según la categoría tarifaria.

Consumo	Demanda (USD/kW- mes)	Energía (USD/KWh)	Comercialización (USD/Consumidor)
Categoría Residencial			
0-50		0.091	1.414
51-100		0.093	
101-150		0.095	
151-200		0.097	
201-250		0.099	
251-300		0.101	
301-350		0.103	
351-500		0.105	
501-700		0.1285	
701-1000		0.1450	
1001-1500		0.1709	
1501-2500		0.2752	
2501-3500		0.4360	
Superior		0.6812	

Por ejemplo, si dentro de la categoría residencial se tiene que la lectura del mes anterior es de 1000 KWh y la lectura del mes actual es de 3500 KWh el consumo generado será la diferencia entre ambos valores es decir que, 2500 KWh será la energía a facturar.

El consumo se obtiene en relación una sumatoria de un factor (que es la diferencia entre los rangos de consumo) multiplicado por valor de energía correspondiente (tarifa) Así, la energía a facturar es de 2500 KWh con un rubro correspondiente a \$ 479.55 dólares y a esto se debe sumar el valor de la tasa de comercialización y los tributos municipales diferentes para cada provincia.

2.2.1.6 Ahorro Energético

La creciente demanda de energía eléctrica corresponde al aumento de la tasa de crecimiento poblacional que requiere cada vez más de energía eléctrica, principalmente, para desarrollar sus funciones dentro de la sociedad. El ahorro energético es la reducción del consumo eléctrico dentro de un sistema mediante la implementación de tecnologías más eficientes, en la mejora de los hábitos de los usuarios o bien en una combinación de ambos [26].

El alcance de este ahorro energético va desde una reducción en la planilla de consumo mensual, hasta lograr un impacto ambiental en las centrales de generación eléctrica. Dentro de las buenas prácticas consideradas al momento de generar un ahorro energético, se encuentran los electrodomésticos presentes en cada hogar y el uso responsable que se pueda desprender de los mismos. Por ejemplo, el adquirir aparatos de línea blanca que tengan certificaciones de bajo consumo, debidamente etiquetadas como se muestra en la figura 6, proporciona al usuario la información de la eficiencia del equipo. Por otra parte, se tiene a la iluminación que representa por lo menos la quinta parte del consumo generado en un hogar por lo que el considerar en apagar luminarias que no se encuentran en uso no es la única salida. La mejor opción se presenta en el intercambiar las luminarias incandescentes por luminarias de bajo consumo, sean estas halógenas o fluorescentes [26].

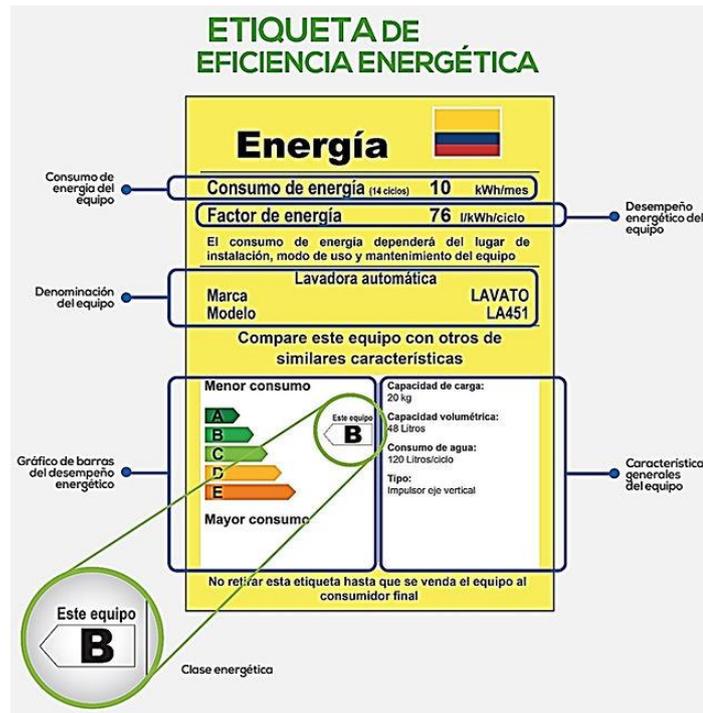


Figura 6. Etiqueta de eficiencia energética en electrodomésticos.

Fuente: <https://www.diselco.co/post/etiqueta-de-eficiencia-energ%C3%A9tica-qu%C3%A9-significa>

Los sistemas domóticos se plantean como otra solución eficiente en temas de ahorro energético, pues le permite al usuario controlar el estado de consumo en su vivienda así como desarrollar estrategias que conlleven a un uso eficiente de los equipos conectados al sistema eléctrico residencial [27].

2.2.2 Sistemas automáticos en la gestión de energía

En la actualidad, se vive la cuarta revolución industrial denominada por el término Industria 4.0. Esta revolución incluye la aplicación y generación de sistemas ciberfísicos, computación en la nube, aplicabilidad de IoT e inteligencia artificial para sistemas de control automático enfocado en resolver diversos problemas de la industria [28].

Los sistemas automatizados son aquellos medios capaces de llevar a cabo una tarea en ausencia de la intervención humana y llevando un control sobre el proceso, retroalimentando al sistema con la finalidad de corregir errores y aumentar la eficiencia. Estos sistemas automatizados están compuestos por diversos elementos como: transductores; pre actuadores, actuadores y ordenadores para el tratamiento de información receptada [29].

El grado de automatización de un sistema está compuesto por niveles de operabilidad compuestos por tipos de estructuras de control y automatización con sus respectivas arquitecturas. En la figura 7 se muestra los niveles de automatización considerados por [29], de los cuales se desprenden:

- **Nivel Elemental.** – En el que intervienen máquinas y subprocesos en los que se asignan funciones de vigilancia, controles de operador y operación de mando con toma de decisiones.
- **Nivel Intermedio.** – Destinado al control clásico, donde intervienen técnicas de control de lazo abierto o cerrado, controladores PID, consideraciones de sintonización, etc.
- **Tercer Nivel.** – Incluye, además del control de procesos, aspectos como: Supervisión, optimización, gestión de mantenimiento, control de calidad. Se diseñan estructuras de control: Control centralizado, Control multicapa, Control jerárquico, Control distribuido.
- **Cuarto Nivel.** – Corresponde al concepto de Fabricación Integrada por Computador (Computer Integrated Manufacturing, CIM) y conceptos complejos de la gestión empresarial asistida por computador.



Figura 7. Niveles de la automatización.

Fuente: Moreno, E. G. (2001). *Automatización de procesos industriales.*

2.2.2.1 Domótica

En la actualidad, los hogares cuentan con sistemas o dispositivos inteligentes que ayudan a los usuarios en el desarrollo de sus actividades cotidianas. Sistemas como:

persianas y puertas eléctricas, climatización, iluminación, sistema de vigilancia y seguridad, electrodomésticos y su control on/off o cualquier sistema eléctrico o electrónico son algunos de los ejemplos de los sistemas que forman parte de los hogares.

La domótica es la integración de estos sistemas, de forma que interactúen entre sí y en este proceso se generen tecnologías orientadas al ahorro energético, control y automatización del hogar y al manejo en tiempo real del sistema eléctrico del hogar. Estas tecnologías combinadas entre sí, convierten a la vivienda en un sistema autónomo capaz de gestionar el consumo de su red, controlar la conexión de los electrodomésticos y proporcionar comodidad a sus usuarios [27].

Las principales características de una vivienda autónoma, según [27], son:

- Integración:
Sincronización de los diversos sistemas que conforman la vivienda domótica.
- Interrelación:
Es la capacidad de los sistemas domóticos de poder relacionarse con otros sistemas dentro del hogar.
- Facilidad de uso:
Correspondiente a la utilización de sistemas de control amigables para el usuario.
- Control remoto:
Control del sistema de manera remota por medio de aplicaciones.
- Fiabilidad de uso:
Confiabilidad en seguridad informática y robustez del sistema.
- Actualización:
Correspondiente a la actualización del software de las Unidades de Controladores.

Para el desarrollo de un sistema domótico es necesario contar con elementos que cumplan con las funciones de medición de parámetros, comunicación entre elementos de medición y control y, almacenamiento de información en gestores de bases de datos. Cumpliendo estas cualidades y creando sistemas automatizados en el hogar, se puede hablar de un sistema domótico.

2.2.2.2 Tecnologías de Control y Gestión de Energía Eléctrica

El principal desafío que se tiene dentro de las tecnologías orientadas al ahorro energético es el costo que representa la inversión y el tiempo de recuperación de esta.

Sistemas como generadores solares o de viento, presentan una solución a corto plazo en lo que respecta a la producción de energía, pero resultan no rentables económicamente para su implementación. Debido al incremento de plataformas de gestión y dispositivos Open Source (Sistemas de Código abierto) es posible el desarrollo de sistemas automáticos para el monitoreo y control de un edificio o residencia con elementos de bajo consumo de energía y de conexiones inalámbricas [30].

Una parte importante en la automatización de la gestión de la energía es el desarrollo de sistemas de monitoreo y control y sistemas de seguridad y vigilancia. Los Sistemas de Monitoreo de Energía y Potencia (EPMS, por sus siglas en inglés) ayudan en la tarea de digitalización de un sistema eléctrico mediante el uso de: sensores o medidores de energía para voltaje, frecuencia de la red, corriente del sistema y potencia de consumo. El EPMS debe tener como característica principal: flexibilidad de aplicabilidad, control integrado para la optimización de energía y proporcionar notificaciones e informes del análisis de la red [30].

Un EPMS se apoya del uso de redes de comunicación inalámbricas para el envío de información y de bases de datos para su gestión. La digitalización de la potencia y energía se logra cuando las variables de interés en un sistema eléctrico, tal como: voltaje, corriente, potencia de consumo u horas de uso, son medidas en tiempo real y enviadas a una base de datos para su posterior elaboración de curvas de consumo y verificaciones del estado de la red. En [31], se plantean tres pasos importantes para la generación de un sistema digitalizado, como se muestra en la figura 8. Como primer paso se tiene a la conexión que significa la obtención de datos sobre el sistema (voltaje, corriente y potencia de la red), el segundo paso es la automatización de las acciones de control (elaboración y aplicación de estrategias de optimización) y finalmente la ampliación, que se define como la extrapolación de los datos obtenidos y estrategias elaboradas a diversos sistemas.

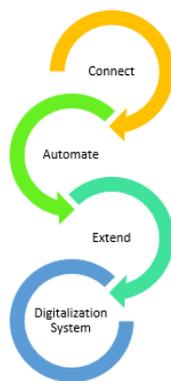


Figura 8. Pasos para la Digitalización de un sistema.

Fuente: Schneider Electric. Elaborado por el Autor.

2.2.2.4 Medidores de energía para EPMS

Los medidores de energía eléctrica residencial, comercial e industrial han pasado por un proceso de mejora continuo, principalmente del funcionamiento y la visualización de los parámetros de medición. Desde el medidor mecánico con una precisión de $\pm 2\%$ en sus lecturas, que registra el consumo en KW/h por medio del efecto electromagnético que se produce en la bobina interna que da a la alimentación del sistema que a su vez gira un disco metálico, que por medio de engranes, va registrando el consumo por determinado número de vueltas, hasta el medidor digital que con una precisión del $\pm 0.5\%$ mejora el proceso de registro de potencia consumida por el cliente [32]. Sin embargo, para el registro de la energía consumida en ambos casos, se mantiene la presencia del personal encargado de la lectura del consumo que por diversos factores como: la altitud a la que está ubicado el medidor, la presencia de suciedad en las pantallas o el acceso al sitio del abonado, entorpecen en gran medida una toma de datos eficiente.

Generalmente, los medidores de energía inteligentes pueden definirse como sistemas capaces de medir diferentes variables de un mismo ambiente por medio de sensores que lo componen. Estos medidores de energía están compuestos principalmente por sensores de voltaje, corriente y módulos de medición de potencia integrados en un mismo ambiente funcionando conjuntamente [32].

Si bien existen módulos para la medición de diferentes variables dentro de un mismo sistema, estos tienden a ser invasivos para el sistema a medir. El uso de sensores independientes soluciona en gran parte este problema. Un sensor es un transductor que

mide una variable física propia de un entorno (por ej. El voltaje o corriente, ver figura 9) y lo convierte a una señal eléctrica. Así, proporciona un dato útil sobre el sistema medido para su manejo o interpretación.



Figura 9. Esquema de un sensor.

Fuente: Elaborado por el Autor.

2.2.3 Internet de las Cosas

El Internet de las Cosas puede definirse como una red conformada por objetos físicos que a su vez están conectados a través de internet, con la finalidad de comunicarse entre sí para compartir datos, acceder a datos almacenados típicamente en aplicaciones de la nube y almacenar e interactuar con la información, de forma que se obtiene un sistema autónomo en el análisis y captura de la información [28].

El Internet de las Cosas (IoT) comprende una red, privada o pública con o sin conexión a internet, en la que se puede dar una comunicación bidireccional entre los objetos físicos que están conectados a la misma red. Estos objetos pueden ser sensores o actuadores y, necesariamente deben tener la capacidad de conectarse a una red, ya sea física o inalámbrica, para enviar datos o recibir acciones de control, según sea el caso. El IoT presenta una amplia flexibilidad para ser incorporado en diferentes sistemas que requieran monitoreo remoto del estado de un proceso o de sus variables [33].

La aplicación de IoT se extiende desde el cuidado infantil, domótica, Smart city y Smart Grid, hasta su aplicabilidad en el sector industrial donde adquiere otro nombre IIoT (Industrial Internet of Thing). Actualmente se vive la cuarta revolución industrial denominada Industria 4.0 y el internet de las cosas juega un papel crucial en su desarrollo, permitiendo el avance de los pilares de la industria 4.0 como: Inteligencia artificial, robótica, computación en la nube, big data y blockchain [28].

La red de sensores inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés Wireless Sensor Network) y la red inalámbrica de sensores/actuadores (Wireless Sensor and Actuators

Network) forman parte integral de un sistema IoT, en la figura 10 se puede observar un breve esquema de lo que sería una WSN, donde se incorpora una puerta de enlace o Gateway entre los elementos de medición y control, con una base de datos en la nube. Las WSN y WSN están conformadas por dispositivos autónomos, capaces de comunicarse entre sí con un bajo consumo de energía y entregando una amplia colección de datos. Constituidos por sistemas embebidos, pueden comunicarse por diversos protocolos IoT y su versatilidad de aplicación se contempla tanto en la industria como en el diseño de un hogar inteligente en lo que respecta al monitoreo de sistemas, seguridad, inteligencia artificial u otros [34].

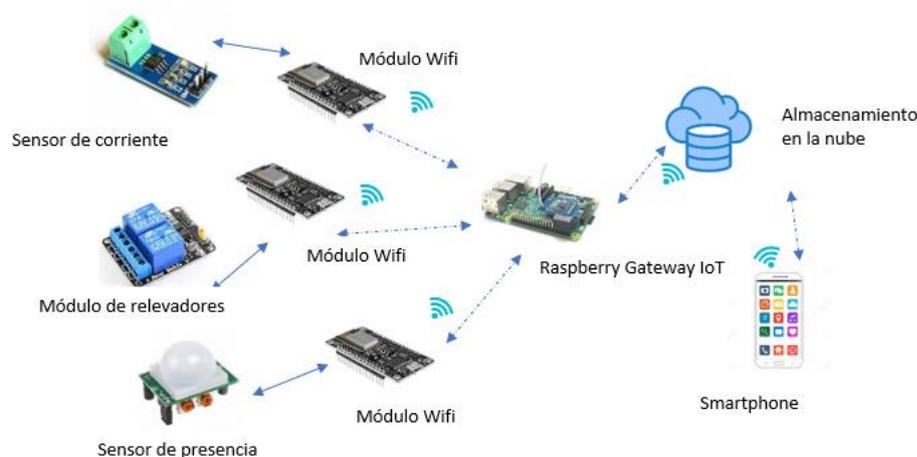


Figura 10. Red inalámbrica de sensores y actuadores IoT.

Fuente: Elaborado por el Autor.

2.2.3.1 Estándar IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 es un protocolo que determina subcapa de control de acceso medio (Medium Access Control, MAC) y la capa física para las redes de área privada inalámbrica de baja velocidad (Low Rate – Wireless Private Area Networks, LR-WPAN). Este estándar contempla las características de redes de sensores inalámbricos de bajo consumo de energía y bajo costo de implementación además de proporcionar estructuras de las arquitecturas disponibles para LR-WPAN de aplicaciones domóticas e industriales [35].

En aplicaciones IoT donde se emplean dispositivos de bajo consumo de potencia y bajo costo WSN, se requieren de ciertos criterios como el ancho de banda para la propagación de la información y comunicación. ZigBee es un estándar que complementa

al estándar IEEE 802.15.4 tal como se muestra en la figura 11, donde el estándar 802.15.4 solamente contempla las capas físicas (Physical Layer, PHY) y de acceso MAC.

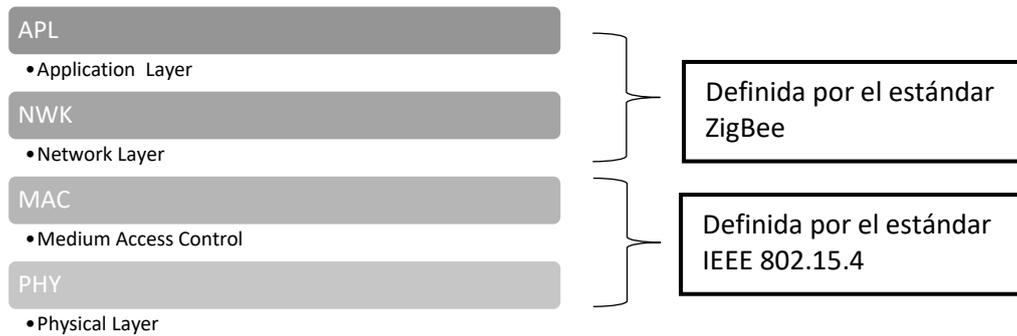


Figura 11. Arquitectura para redes WSN y LR-WPAN propuesto por el estándar IEEE 802.15.4

Fuente: Elaborado por el Autor.

Así, el hardware empleado en redes WSN, WSN y LR-WPAN para aplicaciones de IoT bajo la norma ZigBee/IEEE 802.15.4, presentan una frecuencia general de 2.4 GHz que fácilmente alcanza hasta los 30 metros de propagación en áreas cerradas y 100 metros en espacios abiertos [35].

2.2.3.1.1 Capa física (PHY)

Bajo la norma 802.15.4, la capa física es la encargada de la transmisión y recepción de información en frecuencias disponibles: 240 GHz para la operación del sector industrial y comercial, 865 MHz para la operación en Europa y 915MHz para Estados Unidos [35]. Las características presentes en la PHY son:

- Activación y desactivación del transceptor de radio, que tiene tres estados de operación: transmisión, recepción o modo suspendido (sleeping).
- Detección de la energía, conforme al tiempo de detección de energía se realiza la selección de canales activos o inactivos.
- Indicación de la calidad de enlace, que mide la calidad y fuerza de la señal de enlace o recepción.
- Evaluación de canal claro, encargado de indicar si el medio se encuentra activo o inactivo por el medio de operación de detección de energía o sondeo de carrier o una combinación de ambos.

- Selección de frecuencia del canal, donde una red WSN puede estar definida hasta por 27 canales diferentes.

2.2.3.1.2 Capa de acceso medio (MAC)

Esta capa es la encargada de proporcionar una interfaz de enlace entre la PHY y los protocolos superiores propuestos por ZigBee. El estándar 802.15.4 proporciona dos algoritmos de modo de operación: CSMA/CA ranurado y CSMA/CA no ranurado y, en ambos casos estos algoritmos detectan si un canal a usar se encuentra activo y de estarlo espera 20 ciclos para volver a detectar si el canal está libre o no [35].

2.2.3.1.3 Capa de red (NWK)

En la NWK se establece bajo las características determinadas por la MAC donde se definen los tipos de dispositivos admitidos por la norma 805.12.4 que son:

- Dispositivos de función completa (Full Function Device, FFD) donde un dispositivo puede funcionar como un coordinador de red área personal (Personal Area Network, PAN) para conformar una red centralizada
- Dispositivos de función reducida (Reduced Function Device, RFD) para aplicaciones donde no se requieran enviar grandes cantidades de datos.

Es en la NWK donde también se definen las topologías de redes propuestas por la norma IEEE 802.15.4 y ZigBee donde se determina el número de dispositivos máximos que puede contener cualquier red, que es 2^{16} dispositivos por red [35].

2.2.3.1.4 Capa de aplicación (APL)

Una APL es la capa donde se define el ambiente donde se desempeñan las funciones de los dispositivos bajo los protocolos propuestos por la NWK. Aquí se determinan los roles que desempeñaran los dispositivos que componen una red permitiendo la transferencia de información además de poder establecer conexiones entre sí [35].

2.2.3.2 Plataformas software IoT

Las plataformas software para sistemas IoT pueden considerarse como la parte medular dentro de un sistema que emplea redes de comunicación inalámbricas e integra todo tipo de módulos de comunicación y de sensores o dispositivos de control. Una plataforma IoT se presenta como un software que incorpora diversos dispositivos, mediante protocolos de comunicación, permitiendo así la conectividad entre dispositivos IoT, administración y gestión de dispositivos e información recabada por los mismos, administración de los datos en la nube y presentación de la información al usuario permitiendo así el uso de los datos en acciones de control o definidas por el cliente [36].

En el mercado actual existe una gran variedad de plataformas para aplicaciones IoT y cada una de ellas dista entre sí por sus características específicas como cantidad de datos que se permite almacenar en la nube, almacenamiento de forma gratuita o pago, cantidad de dispositivos que se pueden configurar para que envíen datos a la nube o dispositivos que puedan hacer uso de esta información, entre otras características [28]. La elección de la plataforma dependerá de los dispositivos que se pretenden emplear, el tipo de protocolo escogido para la comunicación o la arquitectura de la red. A continuación, se presenta una breve descripción sobre las más notorias plataformas IoT existentes en el mercado.

2.2.3.2.1 Azure IoT Hub de Microsoft

Azure IoT Hub es un conjunto de servicios propuestos por Microsoft y alojados en la nube que permiten la interacción entre los dispositivos y la aplicación IoT para una comunicación bidireccional, mediante diversos protocolos como HTTP, MQTT, AMQP, entre otros. Azure IoT Hub presenta un catálogo certificado y bien definido, de los posibles dispositivos WiFi que pueden emplearse para su uso y de los lenguajes de programación que admite para su configuración tal como C#, JavaScript, Python y Java [37].

Dentro de los servicios disponibles propuestos por Azure IoT se encuentran:

- Azure Event Grid, para una respuesta rápida y confiable de eventos críticos dentro de un red IoT.
- Azure Logic Apps, para generar la automatización de los procesos de un negocio.
- Azure Machine Learning, para sistemas que requieren de aprendizaje automático y modelos de IA.

- Azure Stream Analytics, para realizar cálculos en tiempo real del flujo de datos observable.

Azure IoT Hub presenta una versión de paga y una versión gratuita cuya diferencia es esencialmente la cantidad de datos que se puedan almacenar y el tamaño de los mismos. Principalmente, Azure IoT Hub proporciona dos niveles de aplicación Nivel Basic y Nivel Standard en la tabla 2 se puede observar los precios de los mismos considerando los de menor valor.

Tabla 2. Precios mensuales por los datos medidos en Azure IoT Hub.

Nivel Basic			
Edición	Precio mensual	No. de mensajes diarios	Tamaño del bloque de mensajes
B1	\$10	400.000	4 KB
Nivel Standard			
Gratis	Gratis	8.000	0.5 KB

2.2.3.2.2 Watson IoT

Watson IoT es una plataforma de almacenamiento de información en la nube y gestión de dispositivos diseñada por IBM, admite ciertos lenguajes de programación como: COBOL, JavaScript, Java, Node.js, Python, entre otros. De igual forma que la plataforma descrita anteriormente, permite el uso de protocolos de comunicación HTTPS o MQTT además de proporcionar seguridad del almacenamiento de los datos y la gestión del ciclo de vida de estos mediante la elección del almacenamiento por un periodo definido [38].

Las principales características que presenta Watson IoT Platform comprenden el desarrollo de APIs seguras, gestión y seguridad de dispositivos. A continuación se detallan brevemente.

- **APIs de Watson y Analítica**, gestión del entorno IoT mediante una plataforma segura, inteligente y escalable. Permite el análisis de la información en tiempo real mediante el diseño de APIs seguras y confiables.
- **Gestión de riesgo y seguridad**, administración de aplicaciones y dispositivos dentro del ecosistema IoT mediante el reconocimiento de patrones, rendimiento y detección de anomalías, validación de datos y transacciones IoT.
- **Escalabilidad** en integración de dispositivos y protocolos HTTP y MQTT.

- **Gestión e integración de datos IoT**, mediante el análisis de datos se puede obtener un registro histórico al que puede acceder los distintos dispositivos conectados a la plataforma.

Watson IoT de IBM presenta una versión paga y gratuita y, al igual que en la plataforma anterior, difieren de la cantidad de datos que permite almacenar. Sin embargo, en el caso de Watson en su versión gratuita permite el permanente de más de 40 aplicaciones proporcionadas por IBM como: IBM Cloud para el almacenamiento de información, IBM Watson Studio para el desarrollo de modelos de machine Learning y IA, IBM Cloud App ID para la gestión de hasta 1000 eventos mensuales en aplicaciones móviles o web, entre otros [38].

2.2.3.2.3 Carriots

Carriots es una plataforma de desarrollo y almacenamiento especializada en proyectos IoT y M2M (Machine to Machine) fundada en España por Carriots S.L en 2011 y adquirida por Altair en el 2017. Carriots es una plataforma como servicio PaaS (Plataforma as Service) de almacenamiento en la nube, que permite el diseño de APIs y proporciona al cliente las herramientas necesarias para la creación de nuevas aplicaciones haciendo uso de Groovy como lenguaje de programación orientada a objetos [36].

Carriots de Altair permite receptor y almacenar todo tipo de información proveniente de los dispositivos conectados a la plataforma, además sugiere la capacidad de escalar rápidamente en la gestión de dispositivos y la capacidad de datos que puedan ser tratados. Dentro del catálogo de hardware compatible con la plataforma se consideran a las más conocidas tarjetas de desarrollo como Raspberry Pi, Arduino y TST Mote, entre otras. Por otra parte, la transmisión de la información entre dispositivos y la nube se realiza mediante protocolos especializados en aplicaciones IoT de baja latencia y potencia como HTTP Rest, MQTT, AMQP, Coap.

Al igual que otras plataformas IoT diseñadas para trabajar en la nube, Carriots presenta cuatro versiones de modelos. En la tabla 3 se presentan las características que más destacan sobre cada modelo proporcionado por Carriots.

Tabla 3. Valores de trabajo en la plataforma Carriots de Altair.

Mín. Dispositivos	Máx. Dispositivos	Máx. Flujo	Tamaño máx. flujo
Modelo: Gratuito			
1	2	500 transmisiones x día 10 transmisiones x minuto	5 KB
Modelo: Corporativo (\$2.59 mensual)			
11	ilimitado	1500 x dispositivo x día 50 x dispositivo x minuto	0 KB
Modelo: Lite (\$0.65 mensual por dispositivo)			
100	ilimitado	25 x dispositivo x día 5 x dispositivo x minuto	5 KB

2.2.3.2.4 Macchina.io

Macchina.io es un conjunto de herramientas orientadas al desarrollo de aplicaciones de forma remota, además proporciona funciones para la creación de soluciones informáticas de IoT. Dentro de las aplicaciones posibles de su uso se cuenta: la automatización de edificaciones y viviendas, pasarelas e informática de borde industrial, sensores inteligentes o sistemas de gestión de energía, telemática automotriz, entre otros [39].

La arquitectura propuesta por Macchina.io presenta un enfoque de desarrollo mediante la conexión de sensores y actuadores, un Gateway IoT, conexión con la nube y el acceso remoto a APIs, en la figura 12 se puede observar la arquitectura base que se implementa en Macchina.io

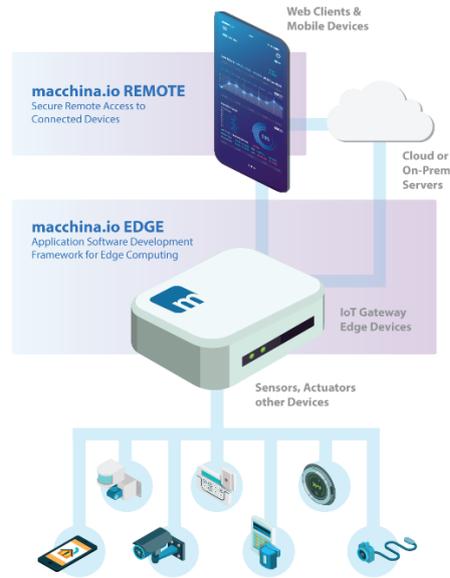


Figura 12. *Arquitectura Edge y Remote de Macchina.io*

Fuente: Macchina.io

Macchina.io emplea MQTT, COAP y HTTP como protocolo de comunicación para los dispositivos conectados a internet y admite JavaScript y C++ como lenguaje de programación en plataforma. Los recursos más importantes que se ofrecen en su página web son Macchina.io REMOTE y Macchina.io Edge. En el primero se permite el desarrollo de APIs móviles o web, admite el desarrollo de protocolos como MQTT e industriales como MODBUS, mientras que en el segundo permite el desarrollo de software en la que es posible la creación de aplicaciones web basadas en Linux, conexión bases de datos SQLite, entre otros [39].

2.2.3.2.5 ThingSpeak

ThingSpeak es un servicio de plataforma Open Source proporcionado por MathWorks, que permite el análisis y la visualización de un flujo de datos enviados por dispositivos conectados a internet o en LAN. Permite la ejecución de código de Matlab en ThingSpeak para el procesamiento de los datos a medida que se van creando y, a su vez, está diseñado para sistemas IoT a pequeña o mediana escala [40].

ThingSpeak admite una gran variedad de hardware que tengan la capacidad de conectarse a internet para la transmisión de información mediante protocolos de comunicación REST o MQTT. Dentro de los principales dispositivos que se encuentran

en el catálogo de dispositivos admisibles por ThingSpeak se tiene a: Arduino, Raspberry Pi, ESP32 y ESP8266. Las características principales de ThingSpeak según [41] son:

- API, proporciona una API sencilla Open Source la cual se encuentra disponible en GitHub para la libre descarga y configuración del código fuente original.
- Canales, de creación simple, son la forma en la que la plataforma almacena y publica los datos.
- Plugins, permite la expansión de las capacidades de la API o para crear aplicaciones en la plataforma mediante el uso de HTML, CSS o JavaScript como lenguaje de programación.
- Integración, de los distintos hardware y software existentes como Arduino, ESP32, Raspberry Pi, Matlab, entre otros.
- Aplicaciones, como: ThingTweet, TweetControl, ThingHTTP, React, Talkback, Time Control.

ThingSpeak está desarrollado como un servicio gratuito para proyectos pequeños y no comerciales correspondientes a menos de 3 millones de mensajes anuales, alrededor de 8200 mensajes diarios. Para la aplicación de proyectos de mayor envergadura, se ofrecen 4 tipos de licencias: Standard, Academic, Student y Home. En la tabla 4 se detallan los valores de estas licencias [40].

Tabla 4. Valores de las licencias ofrecidas por ThingSpeak.

No. Mensajes	Int. Actualización	No. canales	Tamaño máx. flujo
Licencia: Standard (\$710 anual)			
90,000 por día	Cada segundo	250 por unidad	5 MB
Licencia: Academic (\$275 anual)			
90,000 por día	Cada segundo	250 por unidad	5 MB
Licencia: Student (\$45 anual)			
90,000 por día	Cada segundo	10 por unidad	5 MB
Licencia: Home (\$59 anual)			
90,000 por día	Cada segundo	10 por unidad	5 MB

2.2.3.2.6 Thinking Things

Thinking Things es una plataforma de desarrollo de hardware y software ofrecido por la empresa Telefónica. Se trata de un conjunto de dispositivos modulares que integran

diversos sensores y que tienen la capacidad de conexión a internet y que utiliza como estándar de comunicación entre sus dispositivos a la red GSM de cobertura global [41].

Las aplicaciones de los dispositivos modulares de Thinking Things permite el monitoreo de sistemas relacionados con variables como la humedad, temperatura o intensidad de luz en determinado lugar y demás módulos disponibles en el stack ofrecido por Telefónica, ver figura 13, por lo que su uso ha enfocado en dar soluciones automatizadas para el hogar. En colaboración con Arduino permite el desarrollo de hardware abierto y se presenta como solución para proyectos IoT y M2M [42].



Figura 13. Dispositivos modulares Thinking Things de Telefónica.

Fuente: Telefónica, página oficial.

2.2.3.3 Protocolos de comunicación IoT

Los protocolos de comunicación pueden entenderse como el conjunto de reglas o instrucciones estandarizadas, que permiten a los dispositivos o nodos que pertenecen a una misma red, comunicarse con los diferentes componentes y elementos del sistema de red de comunicación [43]. Dependiendo de la topología de red usada y del sistema al que van a ser empleados, los protocolos de comunicación difieren con respecto a sus características físicas de conexión (por ej. El empleo de cable coaxial o fibra óptica), capacidad de expansión de nodos, integración con la web, entre otras características.

En sistemas de IoT existen protocolos especializados para sistemas inalámbricos que se complementan con los sistemas domóticos. En estos sistemas se tienen consideraciones específicas al momento de escoger un protocolo de comunicación, como por ejemplo la distancia a la que se mantiene la comunicación (por ej. Bluetooth presenta un rango de hasta 10 metros de alcance), tipo de medio de transmisión (par trenzado, instalaciones eléctricas existentes, radio frecuencia), latencia, el consumo del ancho de banda o la capacidad para agregar nuevos nodos a las redes [44], [45].

En la publicación realizada por la Asociación Argentina de Control Automático “Protocolos IIoT para considerar” del año 2016, se agrupan los protocolos existentes de IoT en dos categorías: *client/server* y *publish/subscribe*. Dentro de los protocolos del tipo *client/server* se requiere la especificación de los dispositivos que funcionarán como clientes, éstos serán quienes lean los datos alojados dentro de un servidor y para ello necesariamente deberán ser capaces de conectarse al mismo. Este tipo de protocolos funcionan de mejor manera al existir las direcciones físicas como el IP, volviéndolos sistemas de enrutamiento seguros y compatibles. Sin embargo, no presentan escalabilidad en cuanto a dispositivos debido a sus conexiones punto a punto [46].

Por otra parte, los protocolos del tipo *publish/subscribe* consideran a los dispositivos como *publicadores* encargados de entregar la información a un intermediario o *bróker* por medio de *topics*. Los dispositivos que se encargan de visualizar esta información son denominados *clientes* y se suscriben a estos *topics* así, los clientes no se comunican entre sí, sino que lo hacen directamente al bróker. Los protocolos de este tipo funcionan de mejor manera con conexiones remotas o intermitentes y al estar configurados en forma de suscripción a *topics* resultan tener mayor escalabilidad por la capacidad de *suscribir* o quitar dispositivos de los *topics* generados. Sin embargo, la seguridad disminuirá conforme aumente la cantidad de dispositivos conectados [46].

En los siguientes apartados se describirán brevemente los protocolos de comunicación del tipo *publish/suscribe* existentes para sistemas IoT.

2.2.3.3.1 MQTT

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es un protocolo de comunicación basado en el modelo *publish/subscribe*, cuya arquitectura es tal como se muestra en la figura 14, donde un publicador (sensores, MCU) envían información a un servidor o bróker que tiene la capacidad de enlazarse con la nube y con los suscriptores (ordenadores, smartphome) para que, desde los suscriptores, se solicite información del publicador al bróker y poder ejercer acciones de control. MQTT presenta, como protocolo de comunicación, menor latencia y consumo de ancho de banda frente a HTTP o CoAP, convirtiéndolo en un protocolo favorito para sistemas IoT de bajos recursos [47]. Los clientes tienen la capacidad de operar tanto como suscriptores y publicadores.

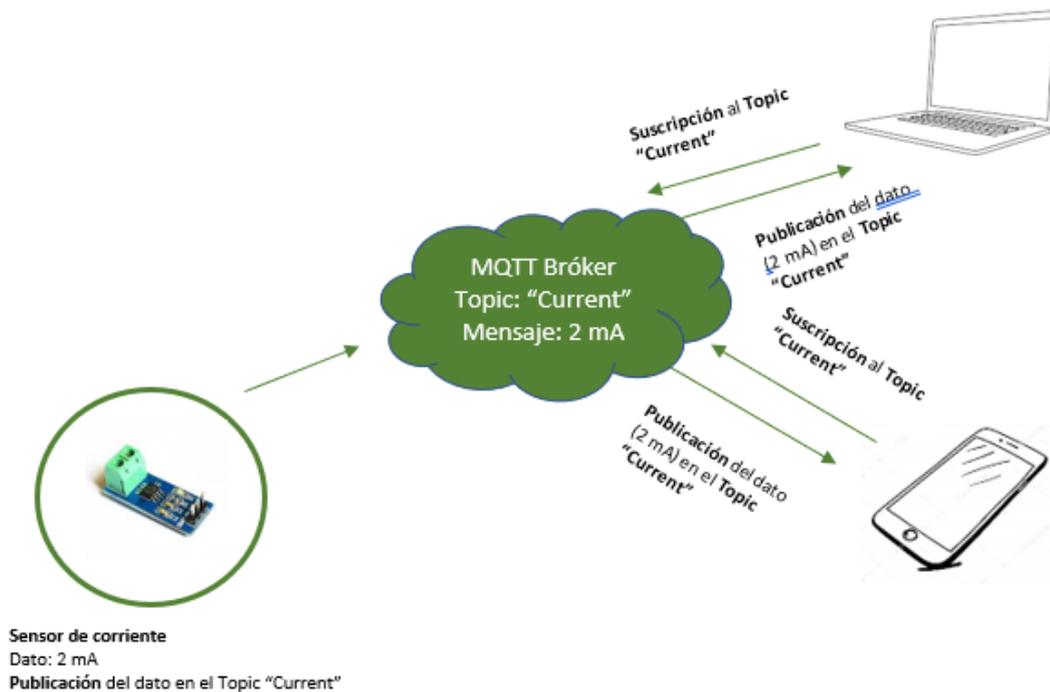


Figura 14. Arquitectura del protocolo MQTT.

Fuente: Elaborado por el autor.

Aunque MQTT está diseñado como un protocolo ligero para dispositivos de bajo consumo de energía, presenta dos inconvenientes principales como lo son el protocolo de TCP/IP para la transmisión de información y que debe soportar cada cliente que publica o está suscrito a un tópico determinado. El otro inconveniente se presenta en el tamaño de las cadenas de las que están compuestos los tópicos que muchos dispositivos de la capa física no pueden soportar [47].

2.2.3.3.2 DDS

DDS (Distribution Data Service) es un protocolo del tipo *publish/subscribe* diseñado para la comunicación de tipo M2M por Object Management Group. A diferencia de otros protocolos del mismo tipo, DDS se basa en una topología del tipo descentralizada con comunicación P2P (peer-to-peer) por lo que no necesita de un *bróker* permitiendo que tanto suscriptores y publicadores puedan comunicarse entre sí. A pesar de que no necesita un bróker si hace uso de un *multicasting*, que se refiere a la entrega de la información o comunicación de forma simultánea con varios nodos de recepción desde un nodo que funciona como emisor y viceversa [47].

La arquitectura que se presenta en el protocolo DDS se muestra en la figura 15, y está compuesta de dos capas: DCPS (Data-Centric Publish-Subscribe) que es la encargada de transferir los datos a los suscriptores y la capa DLRL (Data-Local Reconstruction-Layer) que tiene como tarea el intercambio de datos entre los objetos distribuidos. La capa DCPS consta de varias entidades principales como: *Publisher* quien envía los datos; *Data Writer* que es utilizado por el *Publisher* para el envío de datos; *Subscriber* que recibe los datos del *Publisher* y tiene la capacidad de extrapolarlos a la aplicación; *Data Reader* que es controlado por el *Subscriber* para la lectura de los datos y el *Topic* que está definido por el tipo de dato y el nombre y conecta a los *Data Writer* y *Data Reader* [47].

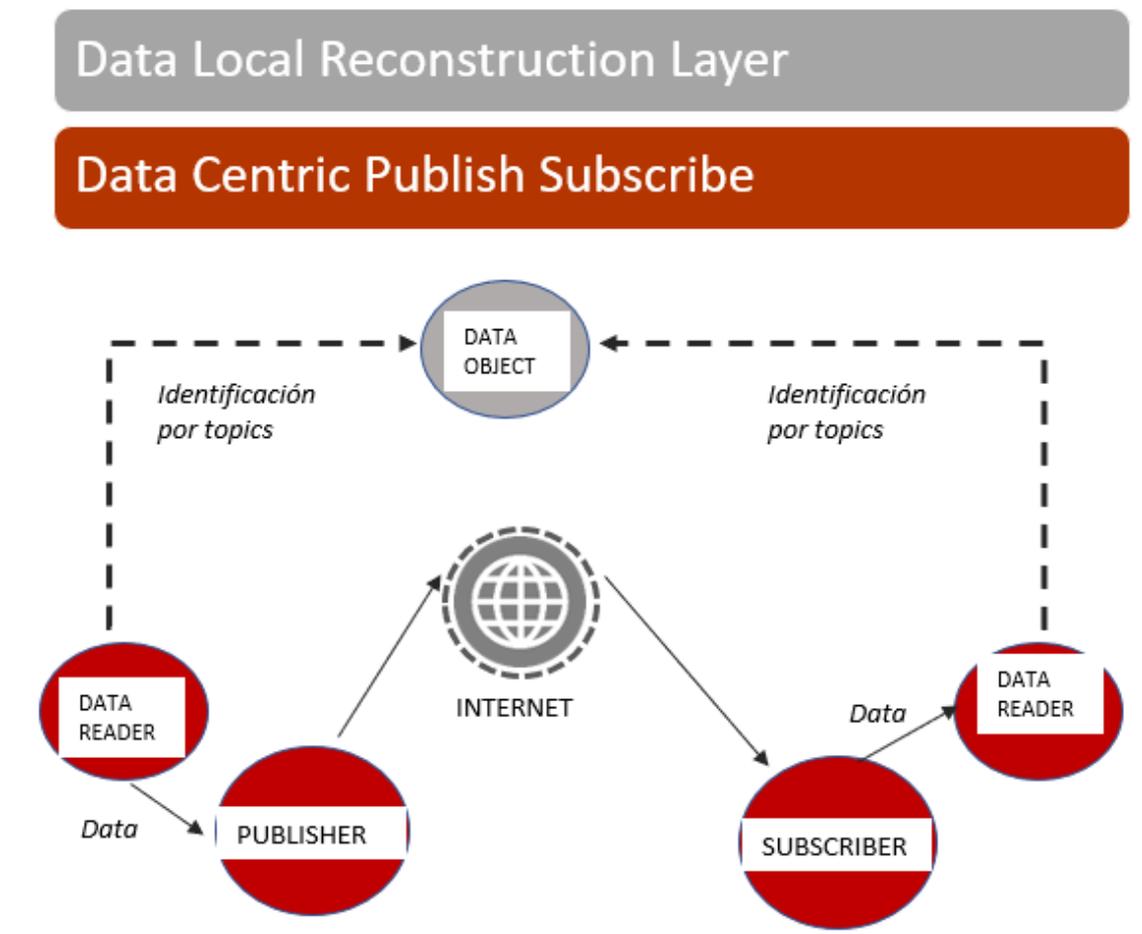


Figura 15. Arquitectura del protocolo DDS.

Fuente: Elaborado por el autor.

2.2.3.3.3 AMQP

AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) pertenece al modelo de protocolos del tipo *publish/subscribe* y está diseñado para que sea capaz de operar en diferentes sistemas

y aplicaciones, concediendo el intercambio de información aun cuando estén implementados en diferentes lenguajes de programación. AMQP cuenta con el lanzamiento de dos versiones distintas siendo la versión AMQP 0.9.1 la que sigue el modelo de publicación/suscripción, y es en ésta versión donde se crean dos entidades básicas dentro del bróker [47].

A diferencia de MQTT que utiliza el *bróker* como una puerta de enlace entre el publicador/*topic*/suscriptor. AMQP implementa una nueva consideración para la conformación de un bróker mediante la aplicación de un *exchanges* (*intercambiador*) y un *message queues* (*cola de mensajes*) tal como se ilustra en la figura 16 correspondiente a la arquitectura del protocolo AMQP. En el *intercambiador* se realiza el enrutamiento de los mensajes a las colas específicas bajo condiciones determinadas, mientras que la *cola de mensajes* corresponde al corredor donde los mensajes esperan ser solicitados por un suscriptor.

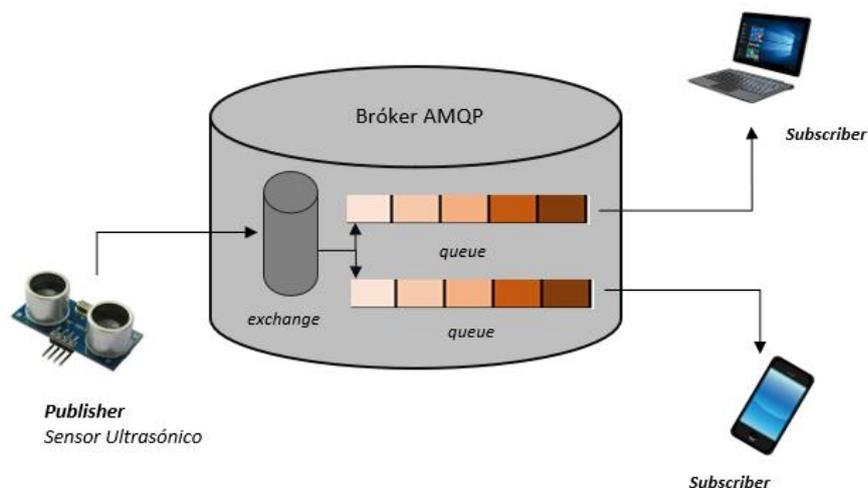


Figura 16. Arquitectura del protocolo AMQP.

Fuente: Elaborado por el autor.

Las versiones más actualizadas de AMQP presentan sus características principales, siendo por ejemplo la versión AMQP V.0.9.1 considerada por su uso del modelo *publish/subscribe*, mientras que la versión V1.0 como adicional al modelo de trabajo integra la capacidad de aplicar el modelo P2P volviendo así, al protocolo AMQP, más flexible en lo que se refiere a esquemas o arquitecturas de comunicación como por ejemplo *client/client*, *client/bróker* y *bróker/bróker* [47].

2.2.3.4 Sistema de Bases de Datos.

Un sistema de gestión de bases de datos (DBMS, por sus siglas en inglés), es una organización definida y estructurada de información o datos normalmente almacenada en sistemas informáticos. Este DBMS está compuesto por datos organizados, generalmente en tablas con columnas y filas, y software de gestión de bases de datos que sirven de enlace para la manipulación de información almacenada [48].

En la gestión energética, donde se aplica una gran diversidad de dispositivos IoT, se tiene una copiosa cantidad de datos sobre las variables físicas medidas por los sensores que componen el sistema. Estos datos son medidos en función del tiempo y en cortos intervalos para facilitar la verificación del estado de la red. Así, resulta necesaria la implementación de un DBMS que pueda manipular estos datos y los almacene para su posterior visualización o si se requiere, sean almacenados de forma temporal con la finalidad de no sobrecargar el espacio disponible [48].

2.2.3.5 Topologías de redes de comunicación

En sistemas informáticos, las topologías de redes o de comunicación corresponden a los medios físicos por los que se enlazan varios dispositivos informáticos a través de nodos (por ej. ordenadores, bases de datos en servidores web, Smart Device) para comunicarse entre sí. Dicho de otro modo, las topologías de redes de comunicación corresponden a las disposiciones físicas de los equipos para comunicarse entre sí, existiendo entonces varios tipos de interconexiones posibles (ver figura 17) [49].

Según [50], las topologías de redes convencionales son del tipo: bus, estrella, estrella extendida, árbol y malla.

Topología de Bus. - Todos los nodos están conectados a un mismo bus de información e interactúan con los datos que circulan por este bus, según sea su configuración [50].

Topología de Estrella. - En la topología de estrella, todos los nodos que componen la red se conectan a un nodo central, también denominado concentrador, que por lo general lo representa un switch [49].

Topología de Anillo. – La conexión de los nodos se produce de forma secuencial y cada nodo se encarga de recibir la información y transmitirla al siguiente nodo [50].

Topología de Estrella extendida. – Sigue el mismo principio que la topología estrella, con la diferencia que cada nodo que de conecta al concentrador puede fungir como un concentrador para otros nodos y formar más estrellas [50].

Topología de Árbol. – Este tipo de topología es de carácter jerárquico, cuenta con nodos principales que traspasan la información a nodos secundarios que funcionan como concentradores de sistemas en estrella [49].

Topología de Malla. – Aquí, cada nodo está conectado el uno al otro permitiendo así que la información que requiere cierto nodo A, pueda venir desde cualquier otro nodo B [49].

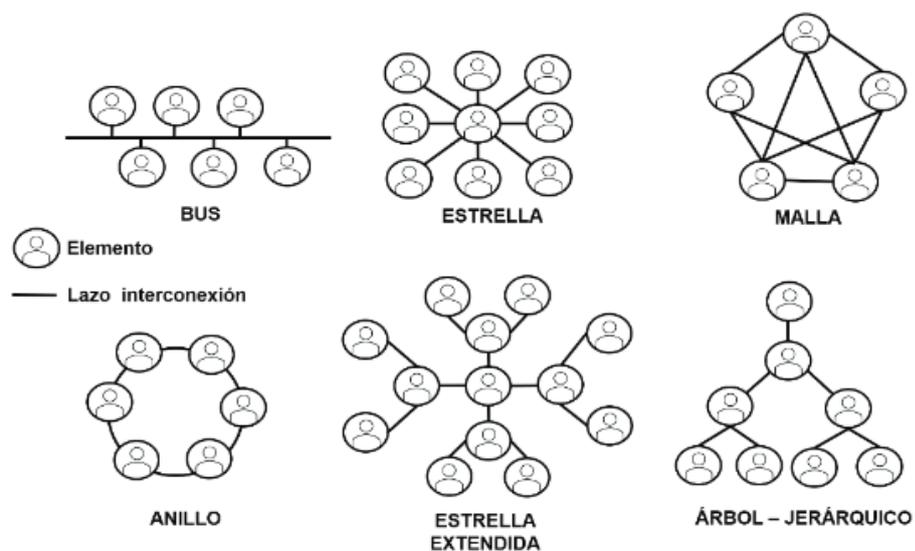


Figura 17. Topologías de red.

Fuente: Protocolos y Topologías utilizadas en los sistemas de comunicación, M. A. Mejía (2021)

2.3 Marco Teórico

En el siguiente apartado se detallarán los artículos y tesis que han contribuido a la realización del siguiente trabajo de titulación. Se expondrá el tema de la propuesta y su relevancia para el diseño de la propuesta de un sistema de ahorro energético mediante el empleo de una red inteligente.

En el trabajo de titulación, “DESARROLLO DE UN SISTEMA IOT PARA EL MONITOREO DEL CONSUMO ELECTRICO DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS DOMÉSTICOS DE MAYOR CONSUMO” realizado en la Universidad Tecnológica Israel y elaborado por Diego Cevallos T. en el año 2020, se expone el diseño de un sistema capaz de monitorear el estado del consumo energético de electrodomésticos mediante el uso de sistemas embebidos. Los datos medidos son enviados a bases de datos para su posterior procesamiento de resultados en una aplicación móvil desde la cual se puede realizar un control On/Off de las cargas conectadas a la red [6].

La publicación realizada por Hafiz M. Hussain para el Center of Advance Studies in Engineering (CASE) de Pakistán en el año 2018, “An Efficient Demand Side Management System with a New Optimized Home Energy Management Controller in Smart Grid” se propone el diseño de un controlador inteligente para la gestión de energía del hogar implementado con técnicas de optimización metaheurísticas. Además, se consideran los pesos como confort del usuario y ahorro económico propios de las funciones multiobjetivo [51].

Por otra parte, el trabajo de investigación e implementación “ An IoT-based Smart Grid Technology: Bidirectional Power Flow, Smart Energy Metering, and Home Automation” publicado en IEEE en el año 2021, por Sowmik Sarker proporciona las nociones básicas de la facturación inteligente realizada por un medidor inteligente de bajo costo implementado con módulos de comunicación ESP32 y tratamiento de los datos en un sistema de gestión de base de datos IoT como ThinkSpeak [5].

En el trabajo de titulación “Sistemas de gestión de energía para Smart Home basados en android” se presenta el diseño de un sistema de monitoreo de consumo de energía dentro de un escenario conformado por una oficina del área de ingeniería de la Universidad Politécnica Salesiana. El sistema de monitoreo está conformado por varias regletas inteligentes que analizan el consumo de equipos específicos y mediante el algoritmo de Pareto, se escogen las cargas que representan el 80% de los resultados para la optimización mediante calendarización de las cargas. Finalmente, se presenta una eficiencia de ahorro de energía del 14.87% ahorrando \$4 dólares al mes [52].

CAPITULO III

El desarrollo del siguiente capítulo tiene como objetivo principal dar a conocer los componentes físicos o hardware, las herramientas informáticas o software y el diseño esquemático de los componentes y la relación que guardan con las herramientas software que han sido necesarias para el funcionamiento de esta propuesta tecnológica.

El hardware seleccionado para el diseño de un sistema de ahorro energético residencial se detalla en el apartado de componentes físicos donde se especifican las características técnicas de cada uno de los elementos empleados, así como, funciones de calibración y la tarea a la que estarán destinados. Por otra parte, las herramientas informáticas empleadas son detalladas en la sección de componentes lógicos donde se exponen las cualidades de cada software utilizado y el beneficio que proporciona al sistema. Finalmente, en la sección de diseño de la propuesta se da a conocer la concatenación entre el hardware y software para la puesta en marcha del sistema con el fin de cumplir con los objetivos planteados.

3.1 Hardware del sistema

El sistema de ahorro energético está compuesto por diversos equipos encargados de tareas como el censado de la señal proveniente de la variable a medir, la conversión analógica/digital de la señal de la variable medida, funcionamiento de comunicación, accionamiento de cargas, convertidores AC/DC, entre otros.

A continuación, se detallan los diversos componentes físicos necesarios para el desarrollo del sistema encargado de medir la señal de la variable de corriente en AC y convertirla en una señal discreta para su posterior procesamiento en una MCU (MicroController Unit) y publicación en la nube.

3.1.1 Node MCU ESP32 Dev Kit-1

El MCU ESP32 Devkit-1 es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ESP32, desarrollado por la empresa Espressif que oferta servicios de comunicación entre dispositivos, desarrollos de pantallas HMI, entre otros. El ESP32 es un microcontrolador de bajo costo y bajo consumo de energía que combina un procesador de doble núcleo de 32 bits con conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada [53].

El ESP32 funciona a una velocidad de 240MHz y cuenta con memoria SRAM de 520KB que le proporciona baja latencia y alta velocidad al acceso de datos. Por otra parte, la placa de desarrollo cuenta con 38 pines distribuidos tal como se muestra en la figura 18.

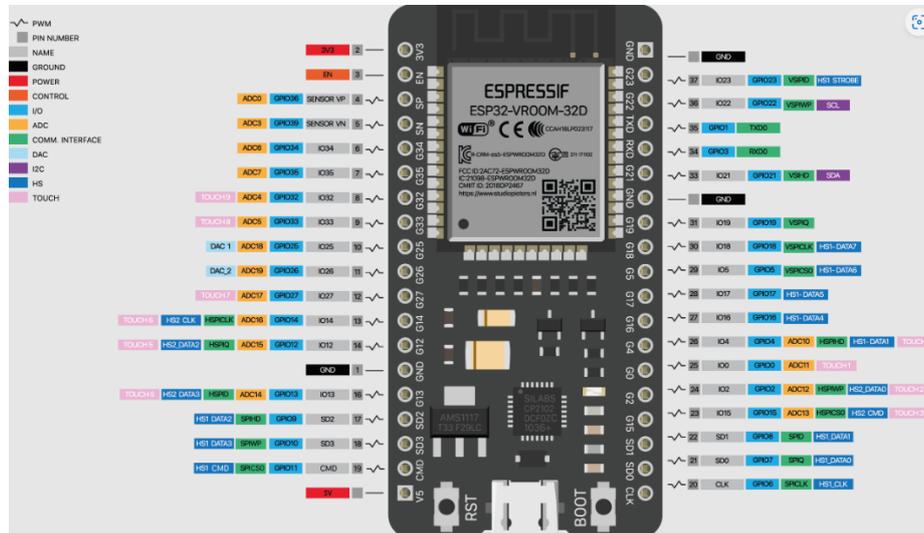


Figura 18. Distribución de pines en la placa NodeMCU ESP32 DevKit-1.

Fuente: Espressif.

Los pines o GPIO pueden ser configuradas conforme surja la necesidad habiendo 22 GPIO que pueden ser configurados ya sea como entradas o salidas, 2 pines destinados para protocolo serial como UART, 2 pines pueden ser destinados para la comunicación bajo la interfaz I2C, entre otras características como la posibilidad de realizar PWM (Modulación por Ancho de Pulso) o ADC con resolución de máximo 12 bits. A continuación, en la tabla 5 se detallan las características técnicas más importantes del NodeMCU ESP32.

Tabla 5. Características técnicas del NodeMCU ESP32.

Características

Modelo de la placa de desarrollo	NodeMCU ESP32 DevKit-1
Microcontrolador	ESP WROOM 32
Cantidad de Pines	38
CPU	2 Núcleos, 240MHz
Memoria SRAM	520 KB
Tensión de alimentación	5 Vdc – 60mA
Voltaje en pines de salida	3.3 Vdc
Potencia	0.3W
Lenguaje de programación	Micropython, C++, C#
Puerto de Transmisión	Micro USB

Dentro de la topología de red diseñada para el sistema de medición de corriente, el ESP32 desempeña el papel de nodo central en cada módulo de medición. Será el encargado de recibir y procesar los datos, a través de la interfaz I2C, del convertidor ADS1115 que a su vez recibe la señal analógica del sensor de corriente SCT013-030. El procesamiento del valor analógico será en función de la resolución del ADS1115, correspondiente al valor de 16 bits. Donde, el escalamiento de la señal estará basada en la ecuación 2:

$$C_i^n = \frac{Val * G}{32768} * V_{TC} [A] \quad [2]$$

Donde:

C_i^n : Corriente medida en el nodo n

Val : valor medido por el ADS1115

G : ganancia configurada para la amplificación de la señal

V_{TC} : valor específico del sensor de corriente.

En la ecuación 1, el valor 32768 corresponde a la resolución del convertidor ADS, que se explica en la ecuación 2. Otra de las funciones que desempeña, es la de establecer la comunicación a la nube para el envío de los datos obtenidos posterior al

procesamiento. La tecnología empleada para dicha comunicación será el estándar IEEE 802.11g, bajo el protocolo HTTP soportado por el ESP32.(indicar que es HTTP)

3.1.2 Conversor ADS1115

El conversor ADS1115 es un circuito integrado desarrollado por Texas Instruments con la capacidad de convertir señales analógicas en digitales con una resolución de 16 bits. En su versión modular desarrollado por la empresa Adafruit el circuito integrado se conecta a una serie de terminales que facilita el acceso a las conexiones e integra además protecciones contra sobre voltajes. Este módulo trabaja con 16 bits de resolución, donde uno de ellos se destina al signo de la señal por lo que solo se tendrían 15 bits para realizar las mediciones lo que corresponde a mediciones comprendidas entre 0 y 32768 [54], tal como se muestra en la ecuación 3.

2ⁿ: Cantidad de Bits disponibles

$$2^{15} = 32,768 \quad [3]$$

Presenta un Amplificador de Ganancia Programable (PGA, por sus siglas en inglés) que está en función de la ganancia que se programe de acuerdo con el voltaje que se mida a través de sus pines analógicos. Esta ganancia programable mejora la precisión de la medición, siendo posible ajustarla en los diferentes lenguajes de programación que soportan distintos editores de código como Visual Studio Code, Arduino IDE, Thonny, Mu, entre otros.

El ADS1115 será el encargado de convertir la señal analógica proveniente del sensor SCT013-030, este sensor entrega una señal análoga de 1v, a una señal digital para su posterior procesamiento en el ESP32. Para poder trabajar con la señal convertida por el ADS es necesario amplificarla a través del PGA del ADS y que está en función del valor de corriente medida por el SCT013. La señal del transformador de corriente SCT-013 será una medida de voltaje por lo que es necesario obtener su valor raíz cuadrada de los valores medios (rms, por sus siglas en inglés). Así se tienen las ecuaciones 4 y 5:

$$V_{i_{ADS}} = \sqrt{2} * V_{o_{SCT}} \quad [4]$$

$$V_{i_{ADS}} = 1.414 v \quad [5]$$

Donde:

V_{oSCT} : voltaje de salida del SCT – 013

V_{iADS} : voltaje rms de entrada al ADS

Así, la PGA está en función del voltaje de referencia que será alrededor de 1.41 voltios siendo necesario configurar la ganancia bajo el parámetro (GAIN_TWO), parámetros establecidos por el fabricante, cuyo valor de referencia va de los -2.048v a los +2.048v. Por este medio se obtiene la resolución del convertidor, que para este caso hace una equivalencia de cada bit por el valor de 0.0625mv, valor que se obtiene en función a la ecuación 6.

$$Fact_{esc} = \frac{V_{ref}}{Resolucion} [6]$$

$$Fact_{esc} = \frac{2.048}{32678} = 0.0625 \text{ mV} [7]$$

Lo que quiere decir es que puede detectar variaciones de voltaje con un factor de resolución de 0.0625 milivolts, logrando medir variaciones de corriente muy pequeñas. Una de las características dominantes del convertidor ADS1115, a parte de la alta resolución de 16 bits, es que cuenta con 4 canales de entradas analógica denominados A0, A1, A2 y A3. Se puede configurar el funcionamiento para cuatro sensores analógicos conectados a las entradas analógicas del ADS conocido como Single o conectar dos señales en modo diferencial entre dos pares de entradas. En la figura 18 se muestra la disposición de los pines del AS1115 de Adafruit, mientras que en la tabla 6 se detalla brevemente cada uno de ellos.

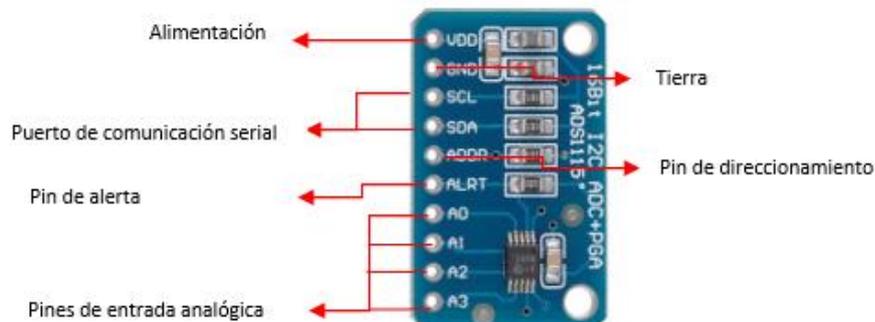


Figura 19. Identificación de pines del convertidor ADS1115.

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 6. Características técnicas del ADS115.

<i>Pines</i>	<i>Características</i>
VDD	2 Vdc a 5Vdc
GND	Punto común o tierra lógica de valor 0
SCL	Pin para la señal de reloj en interfaz I2C
SDA	Pin para la transmisión de la señal de datos en interfaz I2C
ADDR	Pin de direccionamiento
ALRT	Pin de configuración para alertas de flancos
A0:A3	Pines analógicos

3.1.3 Módulo relé JQC-3FF-S-Z de 1CH

El relé basa su funcionamiento en la conmutación electromecánica por medio de la activación de una bobina interna que crea un campo magnético y permite que dos contactos, que en un principio se encuentran separados, se junten, permitiendo la circulación de la corriente de un punto a otro. Inicialmente los relés son capaces de conmutar cargas de corriente y voltaje diferentes a los valores de voltaje y corriente para activar y alimentar la bobina interna.

En lo que respecta al papel que desempeña el relé, este será el encargado de conmutar el estado de las cargas según la programación desarrollada. En la tabla 7, se presentan algunas de las características del relé electromecánico donde, los valores de conmutación de la carga y de alimentación del relé son los más relevantes para no afectar su funcionamiento, mientras que en la figura 20 se presentan las disposiciones de los diferentes pines y los elementos que componen módulo relé.

Tabla 7. Características técnicas del relé JQC-3FF-S-Z.

<i>Características</i>	<i>Descripción</i>
Funcionamiento	Electromecánico
Modelo	JQC-3FF-S-Z
Canales	1 canal
Corriente Nominal	10 ^a
Tensión Nominal	110 a 220 Vac
Tensión Nominal de la Bobina	2.2 a 5 Vdc

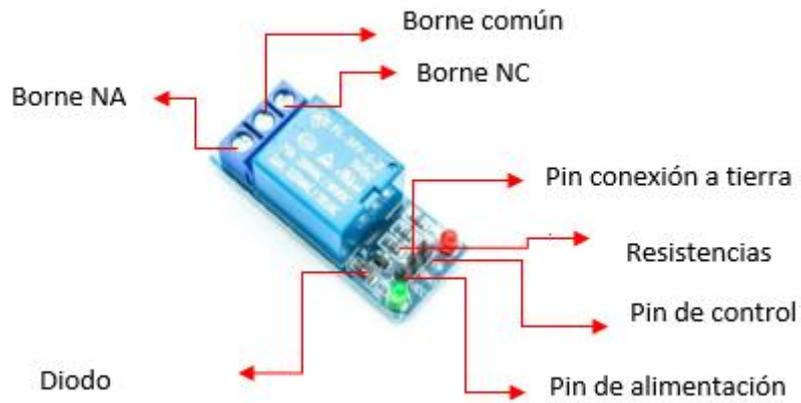


Figura 20. Identificación de los pines y bornes del módulo de relé.

Fuente: Elaborado por el autor.

3.1.4 Sensor de corriente SCT013

El sensor utilizado es un transformador del tipo TC (Transformador de Corriente) que se emplea para la medición de corriente alterna y el consumo de electricidad. El sensor STC013 genera un campo magnético en las mordazas de su pinza, lo cual, permite enviar señales a un dispositivo encargado del procesamiento de la señal. Este sensor tiene una capacidad de medir corrientes de hasta 100 A, con una resolución de 50 mA, lo que proporciona la información necesaria para determinar el equivalente en voltios de cada amperio medido [55].

Existen diversos modelos del sensor SCT013, los cuales difieren los unos de los otros por la capacidad de corriente que pueden medir. Desde el modelo SCT013-005 (que censa corrientes de 0 a 5 amperios) hasta el modelo SCT013-060 (que mide valores comprendidos entre 0 y 60 amperios), la señal que entregan es analógica comprendida entre ± 1 voltios. Mientras que el modelo SCT013-100 entrega una señal de corriente entre 0 y 50 miliamperios. El modelo usado en el presente trabajo de titulación es el SCT013-030 cuyas características se presentan en la tabla 8, según [55].

Tabla 8. Características del sensor SCT013-030.

<i>Características</i>	<i>Descripción</i>
<i>Tipo de sensor</i>	Sensor de corriente TC
<i>Modelo</i>	SCT03-030
<i>Señal de salida</i>	Analógica ($\pm 1V$)
<i>Tensión de alimentación</i>	3.3 V a 5V
<i>Corriente Nominal</i>	0 – 30 A
<i>Exactitud de la medición</i>	$\pm 1\%$
<i>Terminales</i>	Terminal tipo Jack

En la figura 21 se presenta el sensor de SCT013-030 empleado para la medición de la corriente consumida por los electrodomésticos y la corriente total de la residencia.



Figura 21. Identificación del Sensor SCT013-030.

Fuente: Elaborado por el autor

El sensor SCT013-030 con su respectivo controlador, es el encargado de medir la corriente de consumo en cada carga específico. Este tipo de sensores cuentan con un núcleo dividido donde se coloca el cable de la fase y al estar rodeado de un campo magnético producido por el material del núcleo, induce una señal eléctrica sobre el material ferromagnético proporcional a la corriente medida. Esta señal será receptada por el convertidos ADS y posteriormente será escalada y procesada por el MCU. Para la selección del valor correcto del rango del sensor, se debe tener en cuenta la corriente nominal del dispositivo.

3.1.5 Fuente de alimentación HLK-PM01

La fuente de alimentación HLK-PM01 es un módulo compacto y eficiente diseñado por Hi-Link Electronics Co., Ltd, para convertir voltajes de entrada de corriente alterna (AC) a una salida de corriente continua (DC) estabilizada. Ofrece una amplia gama de voltajes de entrada AC, generalmente desde 85 VAC hasta 265 VAC

y proporciona una salida de voltaje DC estabilizado, generalmente a 5 V o 3.3 V. Además, el módulo HLK-PM01 cuenta con protecciones integradas, como protección contra cortocircuitos, sobrecorriente y sobretensiones, para garantizar la seguridad de los dispositivos conectados [56]. En la figura 22 se presenta a la fuente HLK-PM01 y la descripción de los terminales dispuestos en la parte inferior de la misma.



Figura 22. Vista de la fuente HLK-PM01.

Fuente: Elaborado por el autor

La fuente será la encargada de proporcionar tensión de alimentación a la placa de diseño NodeMCU ESP32 que requiere de una alimentación de 5 Vdc. Dentro de las características propuestas por el fabricante se recomienda usar un capacitor de 100 microfaradios a la salida de DC, con la finalidad de eliminar posibles picos de corriente que puedan afectar a circuitos electrónicos que requieran de la alimentación proporcionada. Otras características, disponibles por el fabricante Hi-Link, se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Características de la fuente HLK-PM01.

<i>Características</i>	<i>Descripción</i>
<i>Tensión de entrada</i>	110 – 220 VAC
<i>Tensión de salida</i>	5 VDC
<i>Corriente máxima de salida</i>	600 mA
<i>Aislamiento</i>	Aislamiento galvánico entre entrada y salida
<i>Protecciones</i>	Protección de cortocircuito a la salida <5% Vo
<i>Temperatura de operación</i>	–25 C° hasta 60 C°

3.1.6 Sensor de Presencia PIR HC-SR501

El módulo PIR HC-SR501 es un sensor de detección de movimiento cuyo funcionamiento se realiza por medio de la medición del espectro electromagnético de la radiación infrarroja. Este sensor de movimiento consta de un lente de Fresnel de forma semiesférica que proporciona al sensor un cono de medición de hasta 110° y que, por su forma, concentra la radiación en la parte central del sensor. En la figura 23 se puede observar la disposición tanto del lente de Fresnel como de la ubicación del sensor de infrarrojo y de los terminales de ajuste.



Figura 23. Sensor HC-SR501.

Fuente: Elaborado por el autor

El alcance del módulo HC-SR501 va de un rango de 3 a 7 metros ajustables en su cono de detección. Además, el sensor cuenta con dos potenciómetros de precisión para el ajuste del tiempo en el que mantiene la señal de salida y para el ajuste de la distancia de detección. Las características técnicas del sensor se detallan en la tabla 10.

Tabla 10. Características del sensor PIR HC-SR501.

<i>Características</i>	<i>Descripción</i>
<i>Tensión de entrada</i>	5VDC
<i>Tensión de señal</i>	0 a 3.3 VDC
<i>Grados de detección en cono</i>	Hasta 110°
<i>Rango de distancia de medición</i>	3 a 5 metros

El sensor HC-SR501 es el encargado de detectar la interacción del usuario dentro de un espacio específico del hogar y mediante ello enviar una señal de estado binario, donde el 1 lógico está designado para una tensión de 3.3 Vdc y el 0 lógico está en 0v. El sensor enviará una señal en “ALTO” para que un relé de 5 Vdc conmute su estado normalmente abierto (NO, por sus siglas en inglés) y permita el encendido de una fuente de iluminación.

3.2 Software del sistema

El software del sistema hace referencia a las plataformas de desarrollo de código de programación, a las interfaces de visualización, sistemas de almacenamiento de datos, entre otros sistemas informáticos necesarios para que el conjunto de elementos pueda comunicarse y ejecutar tareas previamente programadas. Dentro de los sistemas informáticos empleados se encuentra de libre acceso tal como IDE Arduino, Python y de forma paga como Matlab o Thingspeak. En los siguientes apartados se detallarán los sistemas informáticos que han intervenido en el desarrollo de la presente propuesta tecnológica, así como la lógica de programación que se ha implementado en cada etapa del presente trabajo.

3.2.1 Thingspeak

ThingSpeak es una plataforma de análisis de IoT perteneciente a Mathworks, que brinda la capacidad de agregar, visualizar y analizar flujos de datos en tiempo real en la nube. Permite la transferencia de datos desde dispositivos hacia ThingSpeak, generando visualizaciones instantáneas y la posibilidad de enviar alertas a través de servicios web como Twitter y Twilio. Además, con el análisis incorporado de Matlab dentro de ThingSpeak, es posible escribir y ejecutar código en Matlab para llevar a cabo tareas de preprocesamiento, visualización y análisis de datos. Esto permite a los ingenieros y científicos crear prototipos y desarrollar sistemas IoT sin la necesidad de configurar servidores o desarrollar software web [40].

Thingspeak permite el uso de protocolos como MQTT, HTTP y la creación de diversos canales para la publicación de los datos. Estos canales pueden ser configurados como públicos o privados tanto para la visualización de los datos en tiempo real, como en la escritura en cada uno de los canales. Internamente cada canal está compuesto de 8 campos posibles para poder ser ocupados para la visualización de la información, además, de

contar con llaves de acceso conocidas como “API KEYS” que facilitan el proceso ya sea de lectura o escritura sobre determinado campo dentro de un canal en específico. En la figura 24 se observa la pantalla principal de la creación de un canal y la información principal para la escritura en campos y visualización de la información.



Figura 24. Vista de la ventana principal del canal “Hogar” creado en ThingSpeak.

Fuente: Elaborado por el autor.

ThingSpeak funciona como bróker dentro de la topología de red propuesta, permitiendo el almacenamiento y visualización de los datos enviados desde cada módulo de medición, así como, el enlace entre el dispositivo móvil del usuario, desde donde se permitirá la acción de control para el sistema. Debido al conjunto de aplicaciones dentro del entorno de ThingSpeak es posible realizar el proceso de filtrado de datos mediante el uso de TimeControl. En TimeControl se programa la ejecución del código de filtrado para un script guardado previamente en Matlab Analysis.

3.2.3 Matlab

Matlab es un entorno de desarrollo utilizado ampliamente en campos como la ingeniería, las ciencias y las matemáticas aplicadas. Una de las principales características de MATLAB es su capacidad para realizar cálculos numéricos y simbólicos de manera rápida y sencilla [57].

Dentro del sistema propuesto, es el encargado de proporcionar las curvas de calibración para los sensores empleados en base a mediciones obtenidas por un equipo de referencia y los valores que arrojan los sensores de corriente SCT013-030 además del filtrado de los datos obtenidos en función de la eliminación de valores atípicos o valores no numéricos (NAN).

3.3 Diseño de la propuesta tecnológica

3.3.1 Descripción del escenario

El escenario en el que será aplicado el sistema de ahorro energético es una vivienda que consta de un local comercial, un cuarto de baño y una habitación. La residencia cuenta con un servicio eléctrico de 220v y se tienen las siguientes cargas instaladas tal como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Identificación de las cargas conectadas a cada fase.

Ítem	Cargas	Vnom	Inom	Pnom	Fase A	Fase B
1	Refrigeradora Mabe	115	1.11	120.64	✓	
2	Refrigeradora Induraba	115	1.87	216	✓	
3	Circuito de luces	120	0.1	67.7	✓	✓
4	Lavadora 15Lb	110	0.8	90		✓
5	Ventilador	120	0.4	50		✓
6	Televisor	120	0.5	50		✓
7	Plancha	110	10.9	1200	✓	
8	Ducha eléctrica	127	42.5	5400	✓	
9	Licuadaora	110	27.3	3000		✓

En la tabla 11 se puede identificar las cargas instaladas por fase, en la vivienda. Se puede observar la ausencia de un correcto balanceo de cargas en las fases que llegan al tablero de distribución de la vivienda. Bajo la premisa “*El sistema fue diseñado para alojar dos sistemas de aire acondicionado, sin embargo, los actuales residentes no cuentan con dichos equipos*”, es posible redistribuir las cargas en una sola línea ya que estas no sobrepasan el valor de la corriente de cortocircuito del sistema de protección. Obteniendo una redistribución de las cargas tal como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Redistribución de las cargas entorno a una sola fase.

<i>Ítem</i>	<i>Cargas</i>	<i>Fase A</i>
1	Refrigeradora Mabe	✓
2	Refrigeradora Induraba	✓
3	Circuito de luces	✓
4	Lavadora 15Lb	✓
5	Ventilador	✓
6	Televisor	✓
7	Plancha	✓
8	Ducha eléctrica	✓
9	Licuadaora	✓

De esta forma es posible medir la potencia de consumo de todos los dispositivos respecto a una sola fase. El sistema de ahorro energético propuesto cuenta con 4 módulos para el monitoreo de los electrodomésticos donde dos de ellos son para el monitoreo de 2 electrodomésticos de línea blanca (Refrigeradoras), un tercer módulo encargado del monitoreo del circuito de iluminación y un cuarto módulo encargado de monitorear el estado de la red eléctrica en términos de potencia consumida y corriente de la línea de tensión A.

Dentro de los equipos y circuitos sobre los cuales se aplica los módulos de monitoreo y control, se tiene que existen cargas que son trasladables y no trasladables. Las cargas no trasladables son aquellas que se las define como cargas a las cuáles no se les puede aplicar algoritmos o acciones de control por respuesta a la demanda o en base al ahorro energético, esto por su funcionamiento [58]. Bajo este concepto, las cargas no trasladables son las refrigeradoras que funcionan las 24 horas del día bajo sus propios ciclos de trabajo. Por el contrario, las cargas trasladables son aquellas que pueden ser objeto de algoritmos de minimización u optimización esto con el fin de generar un ahorro sobre ellas. Las cargas trasladables y no trasladables, dentro del escenario, se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Identificación de las cargas optimizables.

Ítem	Cargas	Trasladables	No Trasladables
1	Refrigeradora Mabe		✓
2	Refrigeradora Induraba		✓
3	Circuito de luces	✓	
4	Lavadora 15Lb	✓	
5	Ventilador	✓	
6	Televisor	✓	

Dentro de la tabla 13 se tiene la identificación de las cargas en relación con su posibilidad de efectuar acciones de control para la optimización del consumo de energía. El tercer módulo, encargado del monitoreo del circuito de luces, ejecuta acciones de control sobre las luminarias escogidas por el residente esto con el fin de tener un control sobre el consumo de las cargas de iluminación. En la figura 25 se muestra el plano de la vivienda y la disposición de las cargas tanto trasladables como no trasladables. En la figura se puede observar que la sala cuenta con dos luminarias, el cuarto de baño con una y el dormitorio con dos luminarias.



Figura 25. Disposición de las cargas de interés dentro del escenario de estudio.

Fuente: Elaborado por el autor.

Por otra parte, en la figura 26 se muestra el diseño 3D correspondiente al plano 2D de la vivienda. En esta figura los módulos de monitoreo están representados por los recuadros verdes ubicados en la sala junto al tablero de distribución principal, en el cuarto de baño y en el dormitorio principal donde se encuentran ubicados dos módulos.



Figura 26. Modelo 3D del escenario de estudio.

Fuente: Elaborado por el autor.

3.4 Arquitectura de la red

Tal como se describió en el capítulo II, precisamente en el apartado de topologías de redes de comunicación, una topología puede definirse como la disposición física de los elementos para comunicarse entre sí. De igual manera, el protocolo de comunicación se refiere al estándar y conjunto de reglas que definen entre sistemas y dispositivos para que estos puedan establecer un canal de comunicación.

Considerando lo antes expuesto, la topología que se diseña para la lectura de datos es del tipo estrella extendida, donde ThingSpeak figura como nodo central que receipta los datos enviados por los nodos de medición compuestos por el NodeMCU ESP32. Además, dentro de cada módulo de medición se cuenta con el sensor ADS1115 por lo que se convierte en otro nodo de recepción de información que se transmite primero a la tarjeta de desarrollo ESP32, se normaliza, escala, procesa y se envía al nodo central que es ThingSpeak. En la figura 27, puede observarse la topología descrita donde se observa cada nodo de medición con su respectivo sensor.

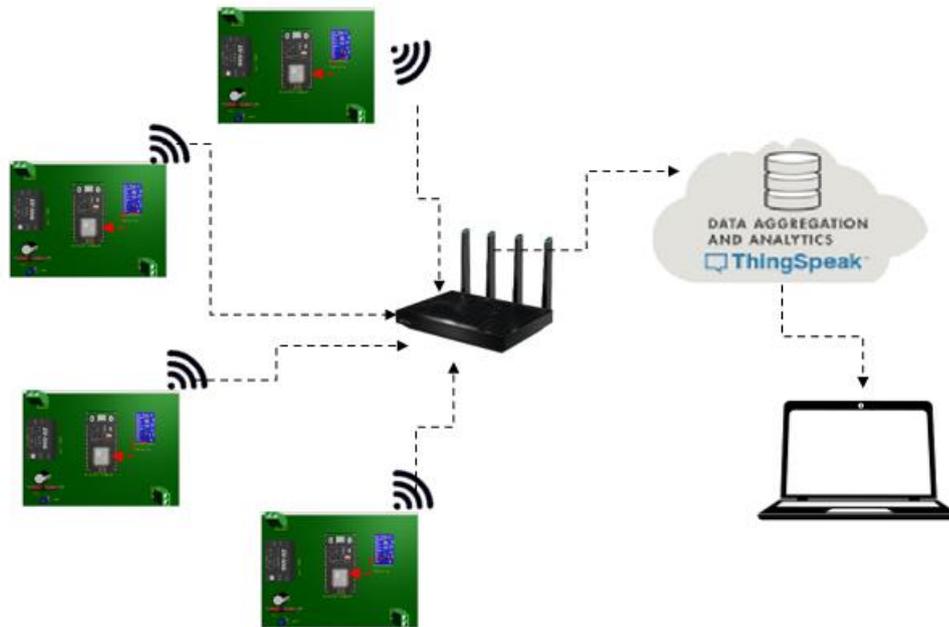


Figura 27. Arquitectura de Red implementada en el sistema de monitoreo.

Fuente: Elaborado por el autor.

Las interfaces y protocolos de comunicación empleados fueron I2C y TCP/IP respectivamente. La interfaz I2C es del tipo serial y funciona a 2 hilos para el envío de información. Este protocolo utiliza un hilo para el envío de la trama de datos que en el ADS1115 está configurado en el pin SDA, mientras que el otro hilo se emplea para la sincronización del envío de los datos a través de la señal de reloj proveniente del ESP32 configurado en el pin SCL. Cabe mencionar que ambos dispositivos cuentan con estos puertos lo que permite el desarrollo de esta interfaz.

Por otra parte, se tiene la interfaz TCP/IP, que es un conjunto de protocolos de comunicación incluido el Protocolo de Control de Transmisión (TCP) y Protocolo de Internet (IP). Dentro de la codificación realizada, el protocolo TCP es el encargado de crear una conexión con ThingSpeak a través de la red WiFi para el envío de datos de escritura a los diferentes campos creados, mientras que, el protocolo IP, se encarga del enrutamiento de los paquetes de datos a través de la red. En la tabla 14, se explica brevemente las acciones realizadas por cada capa de la interfaz TCP/IP.

Tabla 14. Actividades y rutinas generadas en Arduino IDE sobre la interfaz TCP/IP.

Capas de la interfaz TCP/IP	Acciones realizadas	Funciones Ocupadas
Capa Interfaz de Red	Se utiliza la Red Wifi	Conexión mediante Wifi.
Capa de Internet	Uso de las direcciones de nombre de red y contraseñas para enrutamiento con el servidor.	#define Variable_Red “Nombre_de_la_Red” (Variable) #define Contraseña “Contraseña_red” (Variable)
Capa de Transporte	Mediante funciones, dentro del entorno Arduino IDE, se establecen conexiones para el envío de los datos.	WiFi.begin(); (Inicialización de la comunicación Wifi). WiFi.Status(); (Estado de la conexión Wifi)
Capa de Aplicación	Interfaz para el envío de datos y recepción de respuestas por parte del servidor.	ThingSpeak.begin(); (Inicializa la comunicación con el servidor) ThingSpeak.writeFields(); (Envía datos al servidor para escribirlos en los campos)

3.5 Creación del canal en ThingSpeak

Previo al envío de los datos a la nube para su almacenamiento, es necesario crear un canal dentro de la plataforma web de ThingSpeak. ThingSpeak es el bróker del sistema de ahorro. En él se almacenan los datos de potencia y corriente enviados por los módulos de medición integrados por el ESP32 y el ADS1115.

Para poder crear un canal dentro de ThingSpeak es necesario tener una cuenta con MathWorks. Si no se dispone de una, es posible crear una desde ThingSpeak rellenando los campos que se describen en la figura 28.

Create MathWorks Account

Email Address

i To access your organization's MATLAB license, use your school or work email.

Location

United States

First Name

Last Name

Continue

Cancel

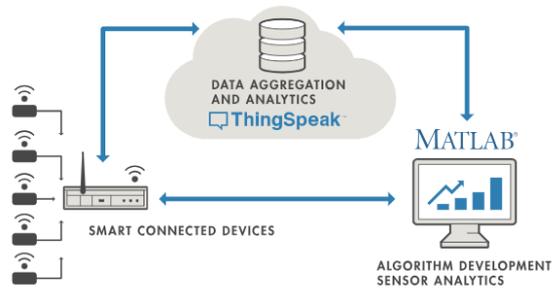


Figura 28. Campos en blanco para la creación de una cuenta en MathWorks.

Fuente: Elaborado por el autor.

Una vez creada la cuenta e ingresado con el correo y contraseña proporcionadas, la interfaz que se muestra se verá tal como en la figura 27.

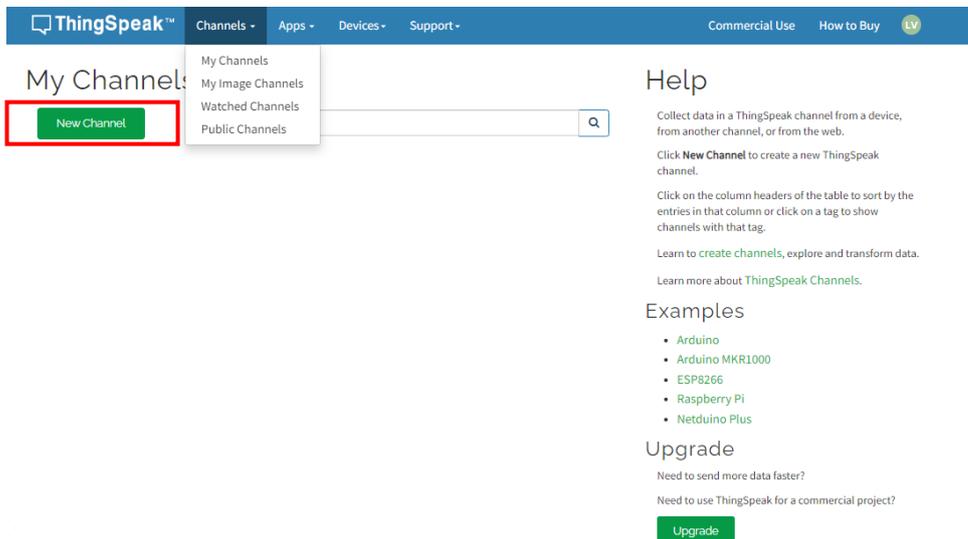


Figura 29. Entorno de inicio en ThingSpeak .

Fuente: Elaborado por el autor.

3.5.1 Configuración de los campos para la lectura

Para la creación de un nuevo canal, bastará dar clic en “New Channel” y se abrirá el asistente para la configuración del canal. Cada canal permite la configuración de hasta 8 campos para la visualización de datos mediante gráficas, textos planos o encendido de símbolos.

En la figura 30 se puede observar la configuración de los campos para la medición de potencia y corriente de las cargas no trasladables y la fase A. Una vez creado el canal

y habiendo configurado los campos, el canal se creará en privado posterior se configura este aspecto, desde la pestaña “Sharing”.



Field	Label	Checked
Field 1	Potencia de Linea	<input checked="" type="checkbox"/>
Field 2	Corriente de Linea	<input checked="" type="checkbox"/>
Field 3	Potencia C. Luces	<input checked="" type="checkbox"/>
Field 4	Corriente C. Luces	<input checked="" type="checkbox"/>
Field 5	Field Label 5	<input checked="" type="checkbox"/>
Field 6	Field Label 6	<input checked="" type="checkbox"/>
Field 7	Field Label 7	<input checked="" type="checkbox"/>
Field 8	Field Label 8	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 30. Configuraciones de los campos en ThingSpeak .

Fuente: Elaborado por el autor.

Uno de los aspectos cruciales para el envío de los datos desde el ESP32 a ThingSpeak, es el uso de las llaves de escritura denominadas “Write API Key”. Esta llave es un código único que se genera en la creación de cada canal, al igual que una llave de lectura, “Read API Key”. En la figura 31 se puede observar las llaves generadas para el canal creado.

Potencia y Corriente de la Vivienda

Channel ID: 2217173
Author: mwa0000030418290
Access: Public

Private View Public View Channel Settings Sharing API Keys Data Import / Export

Write API Key

Key 6D0SBZ23ER27PBC2

Generate New Write API Key

Read API Keys

Key C6C478H3QIB12FVZ

Help

API keys enable you to write data to a channel or read data from a private channel. API keys are auto-generated when you create a new channel.

API Keys Settings

- **Write API Key:** Use this key to write data to a channel. If you feel your key has been compromised, click **Generate New Write API Key**.
- **Read API Keys:** Use this key to allow other people to view your private channel feeds and charts. Click **Generate New Read API Key** to generate an additional read key for the channel.
- **Note:** Use this field to enter information about channel read keys. For example, add notes to keep track of users with access to your channel.

API Requests

Figura 31. Llave de escritura y lectura para el canal de Corriente en ThingSpeak.

Fuente: Elaborado por el autor.

También es posible exportar la información almacenada en formato CSV para su posterior análisis. Finalmente, bastaría con copiar las llaves de escritura para cada canal y adicionarlas a la estructura del código .

3.6 Instalación de Arduino IDE

Dentro del entorno de Arduino IDE es posible descargar librerías y adicionar gestores de tarjetas para placas de desarrollo que estén soportadas en Arduino IDE, tal como lo es la placa ESP32. Para hacer uso de la plataforma y la placa ESP32 es necesario configurar un gestor de tarjetas externo, para ello desde la pestaña Archivo y la opción Preferencias se puede adicionar el URL del archivo .json para las placas ESP de Espressif. En la figura 30 se muestra la configuración del gestor para la tarjeta ESP32. A continuación se proporciona el URL correspondiente para la instalación del gestor de tarjetas ESP32 en Arduino IDE: ***https://espressif.github.io/arduino-esp32/package_esp32_index.json***

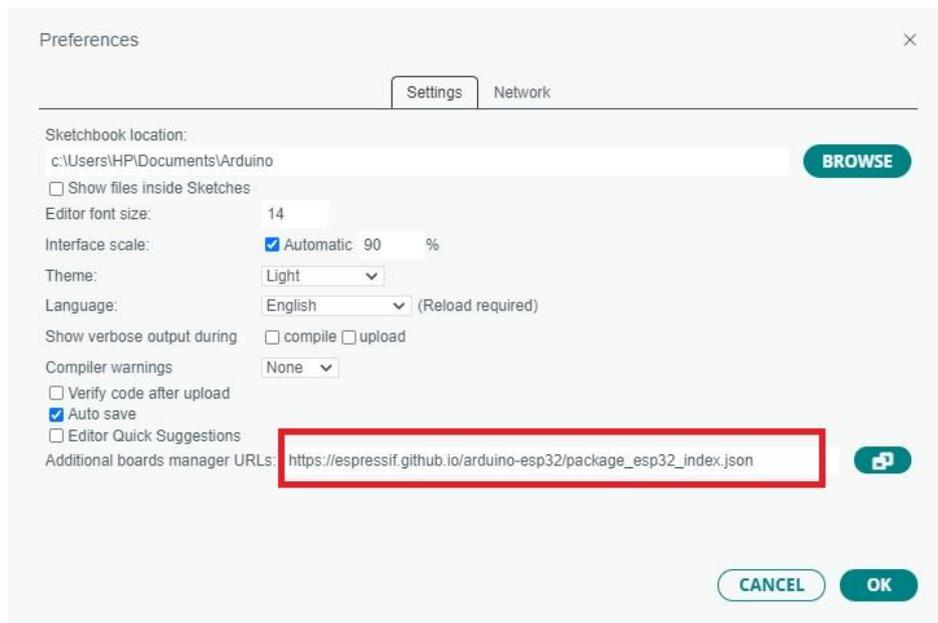


Figura 32. Adición del gestor de tarjetas ESP32 para Arduino IDE.

Fuente: Elaborado por el autor.

Finalmente, tras realizar estas configuraciones será posible cargar un programa sobre la tarjeta. Cabe resaltar, que para poder subir un sketch a la ESP32 será necesario mantener presionado el botón “BOOT” de la placa para el programa se escriba en la memoria del microcontrolador.

3.6.1 Librerías empleadas dentro de Arduino IDE

Para poder realizar una adecuada codificación dentro del entorno de Arduino IDE es necesario e imprescindible el uso de librerías que proporcionan un conjunto de funciones que simplifican, en muchas ocasiones, el desarrollo de la programación. En la versión utilizada y superiores, es posible descargar las librerías desde el mismo entorno. En la tabla 15 se describen las librerías empleadas y su uso dentro de la codificación.

Tabla 15. Librerías empleadas en Arduino IDE.

Librería	Descripción	Uso
<i>Wire.h</i>	Empleada para la comunicación I2C.	El ADS1115 y el ESP32 se comunican por I2C por los pines SCL y SDA de ambos dispositivos.
<i>Adafruit_ADS1X15.h</i>	Facilita el uso del ADC ADS1115 y el modelo ADS1015. Proporciona funciones para selección de ganancias de ambos ADS y funciones de lectura en modo single o diferencial.	Lectura diferencial del sensor SCT013 en los pines A0 y A1. Configura la ganancia correspondiente para el nivel de tensión de salida.
<i>Wifi.h</i>	Librería usada para la comunicación y activación del Wifi.	Gestiona la conexión a la Red Local.
<i>ThingSpeak.h</i>	Librería creada para el envío de datos desde el ESP32 a la nube. Proporciona funciones que facilitan la escritura o lectura de la información alojada en la nube.	Permite la conexión con el servidor alojado en la nube y escribe en los campos creados.
<i>ESP32Time.h</i>	Configura el Reloj de Tiempo Real (RTC) de la placa ESP32 y es posible setear una fecha bajo el formato “Año,Mes,Dia,Hora,Minutos,Segundos”	Realiza la programación de una franja horaria definida y evalúa esa franja por cada hora del día.

Todas las librerías expuestas en la tabla 15 fueron descargadas a través de la plataforma de Arduino IDE y han sido necesarias para el desarrollo del sistema de medición.

3.7 Desarrollo del módulo de medición y monitoreo.

3.7.1 Diseño del sistema de alimentación y el módulo de monitoreo.

Cada módulo de medición cuenta con una fuente de transformación de corriente AC a DC para el funcionamiento de los componentes. La fuente HLK-PM01 es la encargada de funcionar como sistema de alimentación en DC proporcionando 5 VDC a

600 mA. En la figura 33 se muestra el diagrama de bloques para la alimentación del ESP32 y ADS1115.

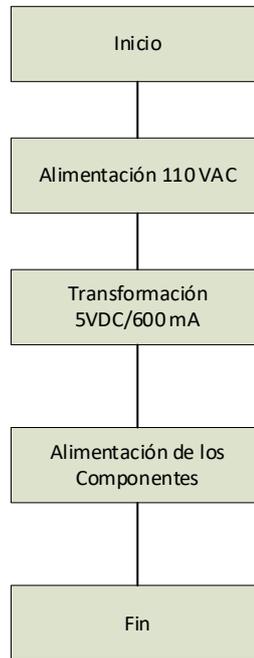


Figura 33. Diagrama de bloques para la alimentación de los componentes dentro de cada módulo.

Fuente: Elaborado por el autor.

El esquema de alimentación resultante, para los componentes, queda tal como se muestra en la figura 34.

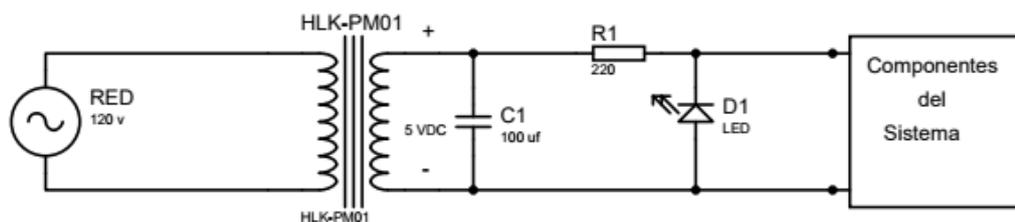
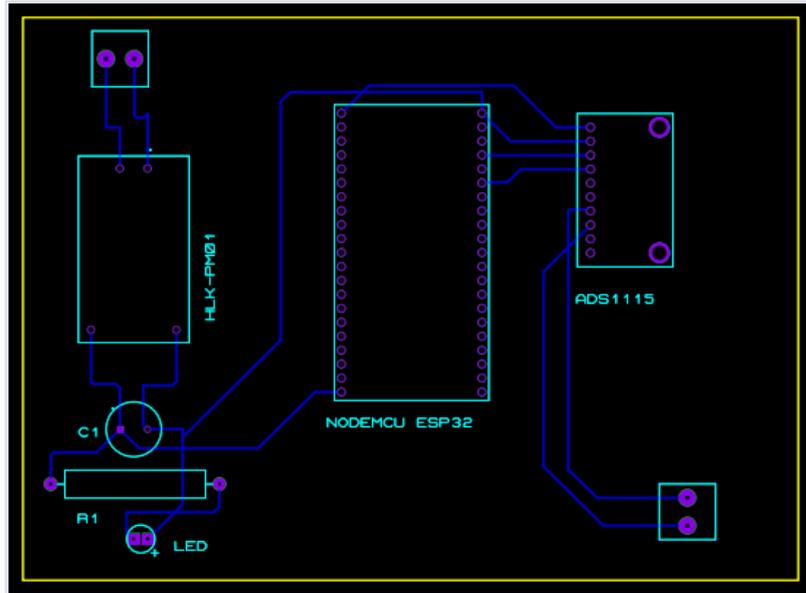


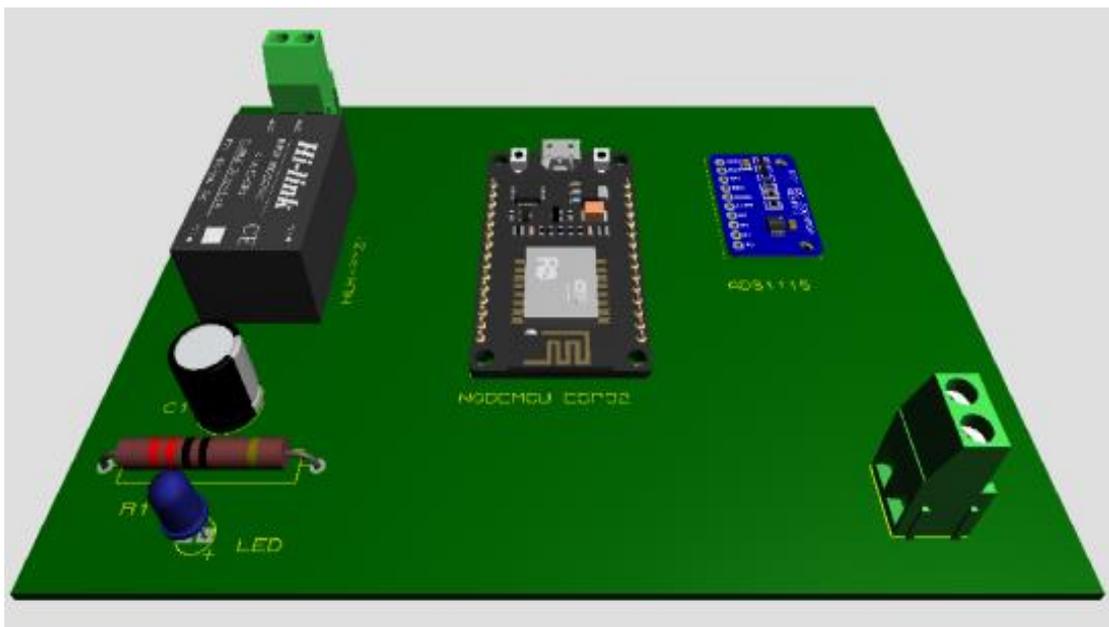
Figura 34. Alimentación de los componentes con un filtro de picos.

Fuente: Elaborado por el autor.

El capacitor C1 se opone a los cambios bruscos en el voltaje en función a su tiempo de carga y descarga. La Resistencia R1 y el led cumplen con la función de mostrar visualmente la presencia de voltaje en la salida de la fuente de alimentación.



a) Diseño PCB del circuito para el sistema de monitoreo.



b) Visualización 3D del diseño en PCB.

Figura 36. Esquemático del circuito electrónico de los módulos de monitoreo y diseño PCB.

Fuente: Elaborado por el autor.

3.7.2 Cálculo de la corriente rms y potencia real.

Dado que el módulo de medición consta de un único sensor como lo es el SCT013-030, se considera el voltaje de la red ideal con un valor de 117 y obtenido a través de mediciones con el equipo H33054.

La corriente rms en tiempos discretos se puede expresar como la raíz de la sumatoria de los valores cuadrados entre la cantidad de muestras tomadas. En la ecuación 8 se expresa la ecuación de la corriente rms en tiempo discreto donde T representa la cantidad de muestras.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{\sum i(T)^2}{T}} \quad [8]$$

Por otra parte, la potencia eficaz es el producto del voltaje y corriente rms por el factor de potencia del sistema tal como se muestra en la ecuación 9.

$$P = V_{rms} * I_{rms} * \cos(\theta) \quad [9]$$

Donde $\cos(\theta)$ representa el factor de potencia. El factor de potencia residencial para el caso de estudio es 1 proporcionado por las planillas de consumo mensuales que emite CNEL. En la figura 37 se evidencia el diagrama de flujo simplificado para la obtención de la corriente y el cálculo de potencia.

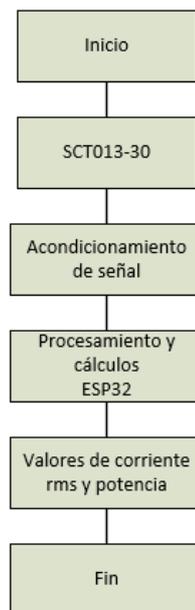


Figura 37. Diagrama de flujo simplificado para la obtención de corriente y potencia.

Fuente: Elaborado por el autor.

3.7.3 Calibración de los sensores de corriente.

Para la correcta medición de corriente por parte de cada módulo de monitoreo es necesario calibrar previamente la lectura de las mediciones realizadas por el sensor SCT013-30 y del convertor ADS1115, que llegan al ESP32. Dado que el sensor SCT013-30 genera una señal analógica de ± 1 voltios y que dicha señal es receptada en los terminales A0 y A1 del ADS1115 configurado para medir la diferencia de valores entre los terminales, se genera el siguiente algoritmo, que se muestra en la figura 38, para la lectura de la señal proporcionada por el terminal SDA del ADS1115 al ESP32.

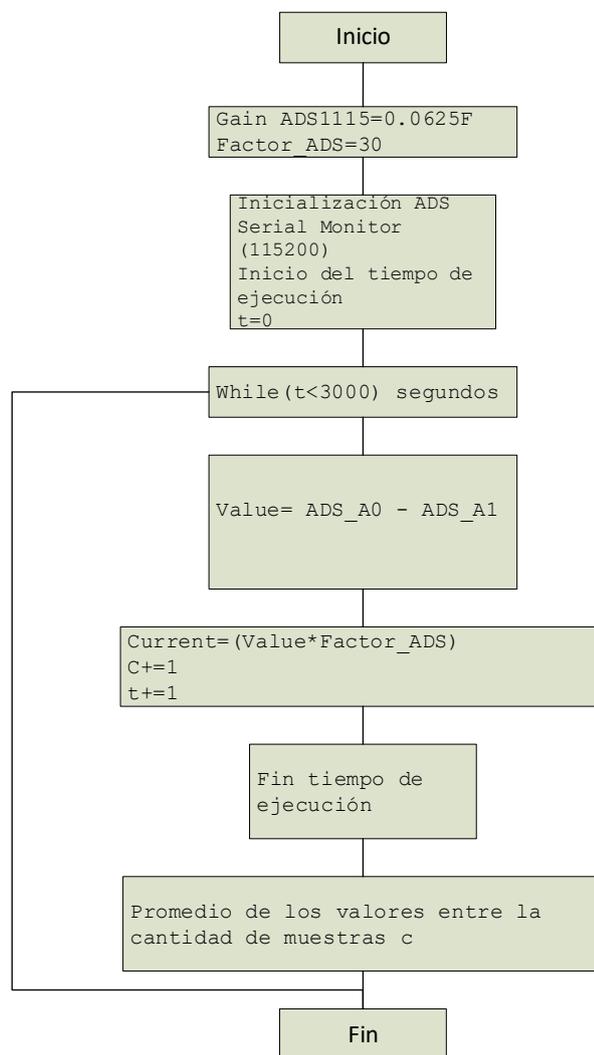


Figura 38. Algoritmo para la medición de corriente del sensor SCT013-30.

Fuente: Elaborado por el autor.

El algoritmo para la obtención de las mediciones está generado en la plataforma Arduino IDE y muestra en el monitor serial el valor promediado de la corriente medida. Para la comparación de los valores obtenidos por el sensor de corriente se ocupó una pinza amperimétrica cuyas características técnicas y especificaciones sobre precisión de mediciones de tensión y corriente en alterna.

Tabla 16. Rango de medición y margen de exactitud del amperímetro H33054.

Características en C.A	Descripción	Margen de Exactitud
Rango de tensión [V]	0 – 750v	± (0.5% + 1gdt)
Rango de corriente [A]	0 a 200 A 0-1000 A	± (2% + 5gdt)

Las mediciones obtenidas por parte del equipo de H33054 fueron recabadas mediante medición directa en diferentes cargas dentro del hogar. En la figura 39 se puede observar la medición de la corriente del sistema y su valor correspondiente rms obtenido por el monitor serial de Arduino IDE.

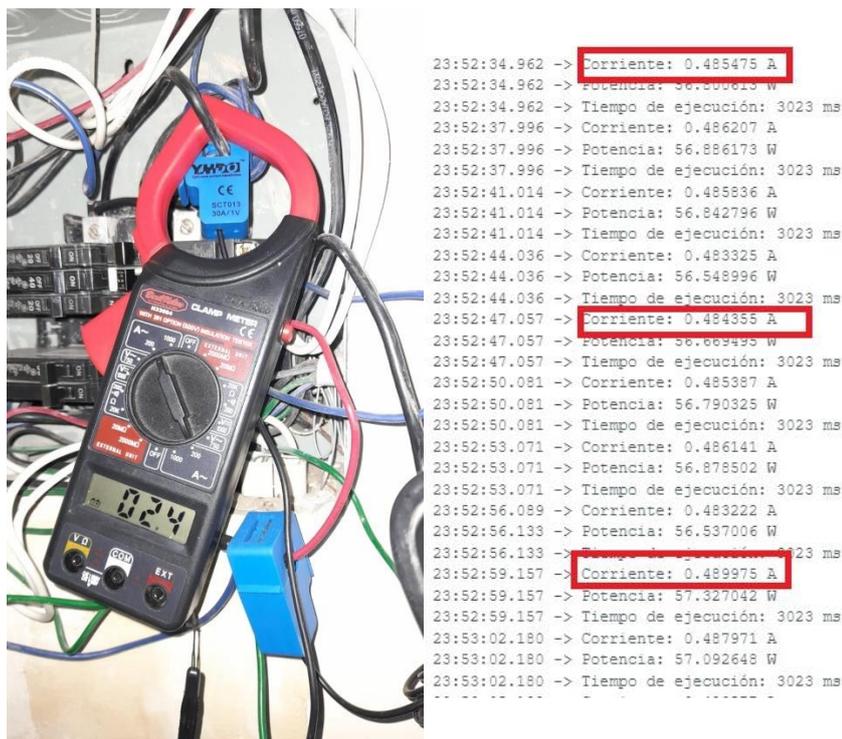


Figura 39. Correspondencia del valor de corriente obtenido por medio de la pinza amperimétrica y su comparación con el valor obtenido por el sensor SCT013-30.

Fuente: Elaborado por el autor.

Los datos de las mediciones realizadas se pueden observar en la tabla 17, donde se especifican las mediciones obtenidas tanto del sensor de corriente como de la pinza amperimétrica.

Tabla 17. Mediciones de corriente del sensor SCT013-30 comparadas con sus respectivos valores medidos a través del equipo H33054 en la misma carga.

Ítem	Mediciones de Corriente [A]	
	SCT013-30	H33054
1	0.001728	0
2	1.415229	9.1
3	0.103389	0.4
4	0.148121	0.6
5	0.045723	0.1
6	2.193872	12.7
7	2.259454	12.8
8	0.091304	0.3
9	0.001834	0
10	0.356897	1.1
11	0.212826	1.2
12	0.297265	1.6
13	0.31882	1.8

Como se puede observar en la tabla 17, los valores obtenidos por el sensor SCT013-30 son muy diferentes de los valores reales obtenidos por la pinza amperimétrica por lo cual resulta necesario una correcta calibración en las mediciones. Mediante el uso de Matlab es posible diseñar una interpolación polinomial para conocer una aproximación de los valores comprendidos en los rangos de valores donde no se tiene información. Con la función *polyfit()* es posible ajustar la curva de un conjunto de datos en una función polinomial. Los argumentos de entrada para la función *polyfit()* son:

$$p = \text{polyfit}(x,y,n)$$

Donde:

x : Conjunto de valores que se desean ajustar.

y : Datos referenciales para el ajuste.

n : Grado del polinomio resultante.

Se toma como variable “x” al conjunto de valores del SCT013-30 y al patrón de datos “y” al conjunto de valores de la pinza amperimétrica. El valor de “n” se determinado en base al error generado posterior al ajuste polinómico de cada valor. En la figura 40, se puede observar la gráfica correspondiente donde los valores del SCT013 se ubican en el eje de las abscisas mientras que, los valores correspondientes a los valores en el eje de las ordenadas.

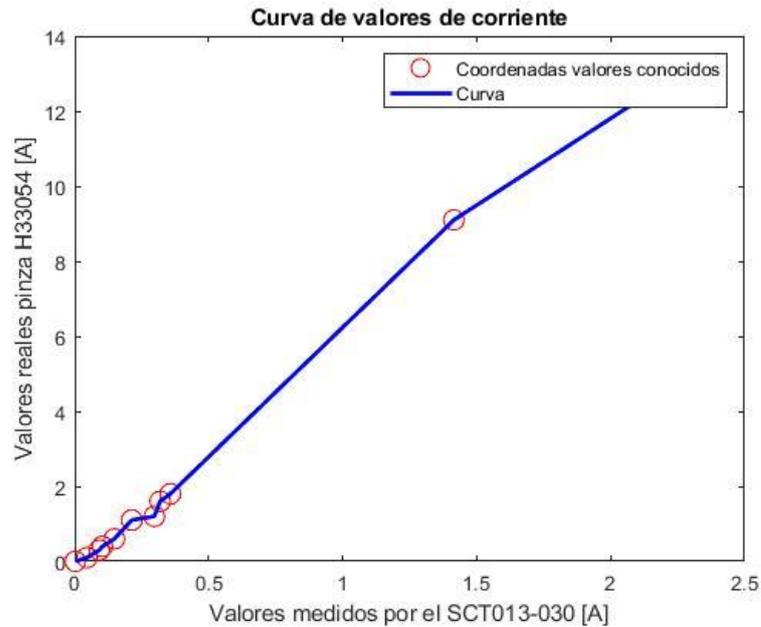


Figura 40. Curva correspondiente a los valores de corriente medida.

Fuente: Elaborado por el autor.

3.7.4 Desarrollo para obtener la energía consumida.

La energía consumida puede calcularse por medio de la multiplicación de la potencia consumida en determinadas horas, conforme se emplea la ecuación 1. Al obtener una señal de potencia en función del tiempo, es posible considerar 3 enfoques para el cálculo de la energía eléctrica.

En el primer enfoque se considera calcular la energía de la señal medida en potencia (Watts) y al terminar el cálculo se obtiene el valor de la energía producida por la señal en determinado tiempo [59], tal como se muestra en la ecuación 10.

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt \quad [10]$$

En tiempos discretos puede ser reformulada como indica la ecuación 11.

$$E = \sum_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 \quad [KWh] \quad [11]$$

En tiempo discreto se presenta como una suma acumulativa de los cuadrados de la señal evaluada. Uno de los inconvenientes al tratar de calcular la energía por la suma acumulativa es que al evaluar picos estos serán elevados al cuadrado e incrementarán el resultado de la suma a valores muy altos. Sin embargo, es de utilidad al tratar de determinar la energía acumulada en cierto periodo de tiempo.

El segundo enfoque es calcular el área bajo la curva de la señal de potencia y dividirla entre el factor de KW. En la ecuación 12 y 13, se muestra la expresión matemática para el cálculo de la señal mediante su integral representada en tiempo discreto.

$$P = \sum_{i=1}^n x(n)_i \quad [Wh] \quad [12]$$

$$E = \frac{P}{1000} \quad [KWh] \quad [13]$$

El problema de aplicar este enfoque radica en que la señal $x(t)$ mantiene pequeñas señales que no son cero, en las mediciones realizadas por el sensor para una corriente de 0A marca 0.002A aproximadamente, por lo que se incrementa su potencia y por ende la energía.

El tercer enfoque resulta de medir cuanto tiempo se ha mantenido en “ALTO” la señal de potencia y cuánto tiempo se ha mantenido en “BAJO”, puesto que la señal de potencia, debido a la operación de las cargas, sigue un patrón de una onda cuadrada, y sumar estos valores y dividirlos para la cantidad de muestras en las que se ha mantenido en ALTO. En la ecuación 14, se expresa de forma matemática del enfoque descrito.

$$E = \frac{\sum PH + \sum PL}{T * 1000} \quad [KWh] \quad [14]$$

Donde:

PH: Potencias por encima del umbral.

PL: Potencias por debajo del umbral.

T: Cantidad de muestras en que la señal se ha mantenido en ALTO.

Se ha considerado el tercer enfoque para el cálculo de la energía de la señal de potencia proporcionada por los módulos de monitoreo. El umbral escogido se basa en el valor de la corriente cuando está en BAJO, este valor medido por el equipo H33054 es de 0A mientras que su correspondencia por el sensor SCT es de 0.02A con una potencia aproximada de 3W. Por tanto, se establece un umbral de 3W para la caracterización de una señal cuando esté en alto o en bajo.

3.7.5 Desarrollo para obtener el precio de la energía consumida.

El proveedor del servicio de energía eléctrica proporciona mensualmente una planilla donde se detallan:

- Energía consumida actual (E_{act}).
- Energía consumida anterior (E_{cant}).
- Rango de consumo ($Rng_consumo$)
- Energía consumida.

La energía consumida se calcula por medio de la diferencia de la energía consumida actual y la energía consumida anterior multiplicada por el rango de consumo detallado en la tabla 1 del pliego tarifario impuesto por el ARCERNNR. En la ecuación 15 se puede observar el cálculo del valor de la energía consumida.

$$Consumo = (E_{act} - E_{cant}) * Rng_consumo \quad [15]$$

Por otra parte, el valor total de la planilla es la sumatoria del consumo más la tasa de comercialización y servicios como:

- Tasa de comercialización (T_c).
- Subsidio solidario (S_s).
- Alumbrado público (A_p).
- Cuerpo de bomberos (C_b) y tasa de recolección de basura (T_b).

Por tanto, la ecuación 16 representa la sumatoria de todas las tasas incrementales a la factura mensual de consumo de energía eléctrica.

$$Valor(\$) = Consumo + Tc + Ss + Ap + Cb + Tb \quad [16]$$

En la figura 41 se puede observar el diagrama de flujo para determinar el valor económico generado por el consumo total de la vivienda medida desde la línea A. El diagrama de bloques calcula la energía consumida anterior y actual en base a un determinado lapso.

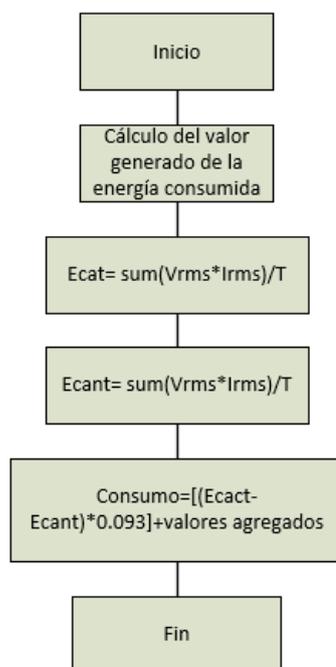


Figura 41. Cálculo del valor económico relacionado con la energía eléctrica consumida.

Fuente: Elaborado por el autor.

El consumo resultante que debe ser cancelado es la diferencia de las energías antes calculadas. Para el caso de estudio, se toma un periodo de dos semanas, para el cálculo tanto de la potencia consumida actual como de la anterior.

3.7.6 Desarrollo para el envío de datos.

Los datos que se envían hacia ThingSpeak son la corriente rms y la potencia eficaz. Posterior al cálculo de dichos valores, se formula un algoritmo para el envío de los datos. ThingSpeak en su versión gratuita actualiza los campos creados cada 15 segundos. Sin embargo, a este tiempo de actualización se debe sumar el tiempo de máquina empleado para el cálculo de los valores de corriente y potencia. En la figura 42 se muestra el diagrama de bloques empleado para el envío de los datos hacia los canales

designados, donde se emplea el código de respuesta de HTTP, 200. Este valor se almacena en la variable “*httpStatus*” y de tener el valor 200 indica que la solicitud de envío de datos ha sido favorable y los campos han sido actualizados.

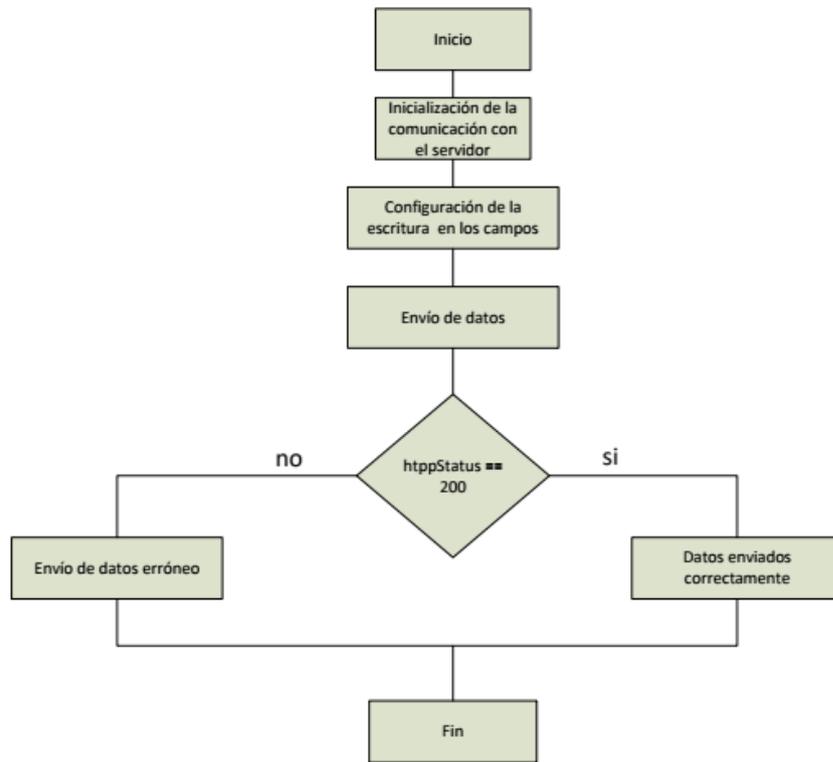


Figura 42. Diagrama de verificación del envío de los datos hacia el bróker.

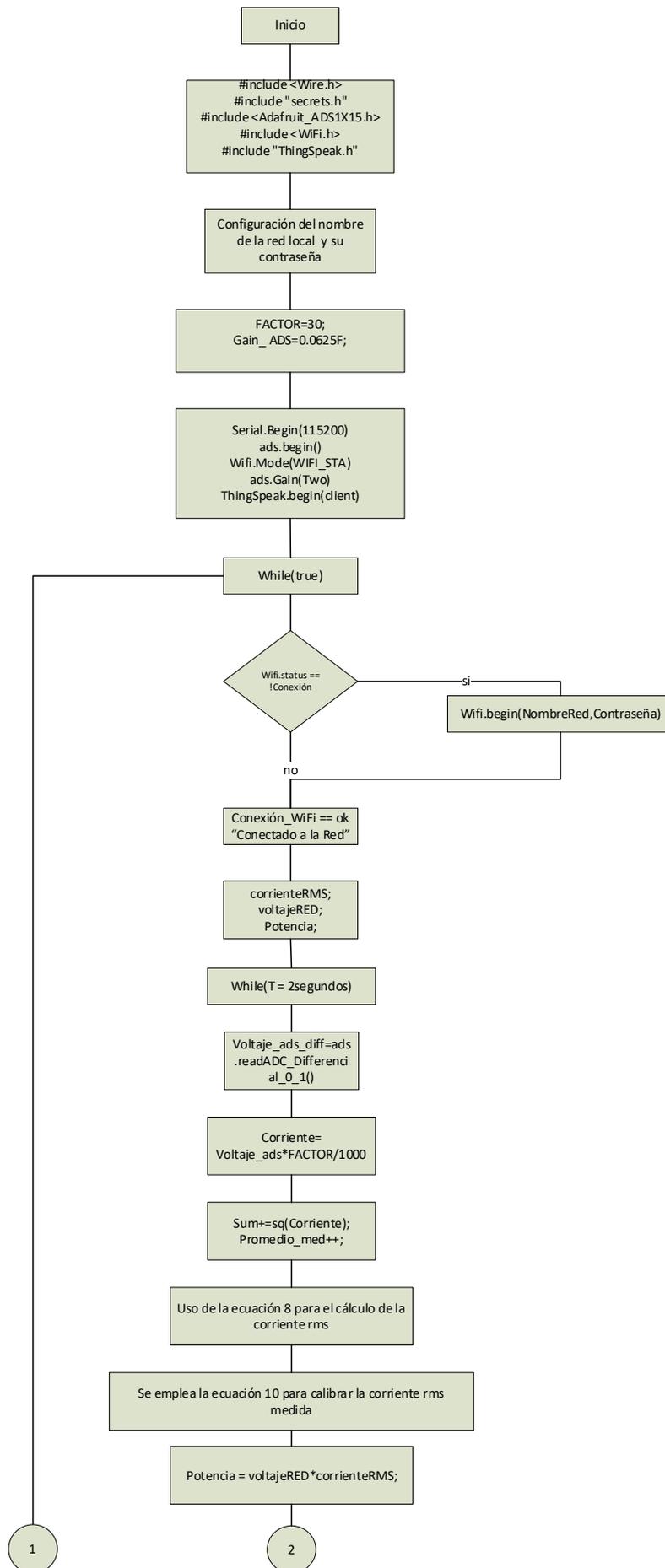
Fuente: Elaborado por el autor.

Dado que el costo computacional, durante la obtención de las variables de interés es alto, alrededor de los 5 segundos, los campos serán actualizados entorno a los 15 o 20 segundos.

3.8 Programación de los módulos para el envío de potencia y corriente de los equipos.

Cada módulo es programado en la plataforma Arduino IDE para el envío de los datos de corriente y potencia hacia el bróker. Dentro del canal asignado y en los campos escogidos, se presentan las gráficas respectivas para los valores enviados. En la figura 43 se presenta el algoritmo empleado en la programación de los módulos. En esta figura, *While (True)* representa la función “*void loop()*” para una repetición del código en cada momento del día. Dentro de esta función repetitiva se inicializan las variables de corriente

y potencia que estarán cambiando su valor por cada medición realizada. Por otro lado, se tiene el cálculo de la corriente rms y su posterior ajuste por medio de la ecuación de ajuste presentada en el apartado de calibración del sensor de corriente. Finalmente, el diagrama primero setea los valores en los campos mediante la instrucción “*ThingSpeak.set(field,value)*” con los valores respectivos tanto para la corriente como la potencia y luego hace el llamado a la instrucción “*ThingSpeak(channelNumber,WriteApiKey)*” para actualizar estos valores de los campos y conjunto con “*httpStatus*” se verifica si los datos han sido enviados y actualizados correctamente. Es de suma importancia establecer primero el seteo de los campos y después la actualización del canal puesto que, si no se sigue esa estructura, los canales no serán actualizados de forma correcta.



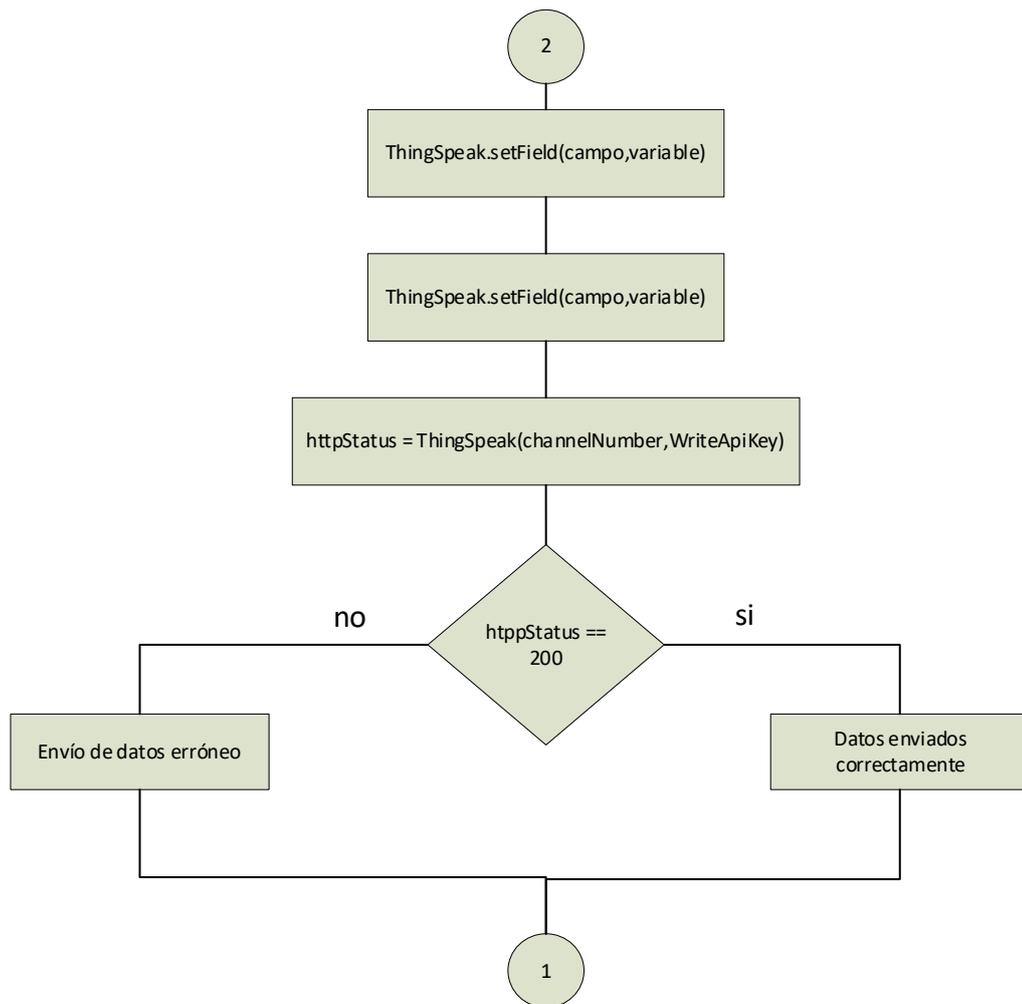


Figura 43. Diagrama de flujo para la programación montada sobre la tarjeta ESP32.

Fuente: Elaborado por el autor.

3.9 Presupuesto de la propuesta.

Para la realización del presente proyecto se hará uso de recursos como tarjetas de programación de código abierto con conexión inalámbrica IoT así como de sensores de corriente no invasivos y bases de datos web. En la tabla 18, se muestra el valor generado para la implementación de la propuesta tecnológica.

Tabla 18. Valor económico de los dispositivos necesarios para el proyecto.

<i>Ítem</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Descripción</i>	<i>Precio Unitario (USD)</i>	<i>Precio Total (USD)</i>
1	4	NodeMCU ESP32 Dev-Kit 1	12	48.00
2	4	ADS1115 16 bits de resolución	7	28.00
3	4	Módulo relé de un canal 5v	2.75	11.00
4	5	SCT013-30	11.50	57.50
5	4	Fuente HLK-PM01	6.90	27.60
6	4	Resistencias 220 OHM	0.20	0.80
7	4	Capacitor electrolítico 100 uf 16v	0.18	0.72
8	4	Diodo led 5mm	0.10	0.40
9	12	Espadines hembra 1x40	1	12.00
10	12	Borneras dobles	0.25	3.00
11	4	Baquelita perforada 10x15 cm	1.50	6.00
12	15m	Cable UTP CAT 5e	0.35	5.25
13		Otros		20.00
			Total	220.27

3.10 Tratamiento de datos en Matlab

Dado que ThinkSpeak permite la exportación de la información almacena en formato CSV y que dichos datos, debido a la latencia de los módulos en generar los datos y el tiempo de actualización del bróker, se pierden o no se actualizan correctamente, es necesario darle un correcto tratamiento a la información receptada.

Los datos no actualizados se guardan como tipo NAN (No numérico, por sus siglas en inglés). Matlab permite identificar estos valores NAN y aproximar sus valores, que se identifican como celdas vacías, conforme a la aproximación del vecino más cercano. A continuación, se detalla la codificación generada en Matlab para la identificación de la información exportada, la interpolación de los datos faltantes o NAN y la segmentación de la información en función del tiempo de medición.

3.10.1 Identificación de datos.

Posterior a la exportación de los datos desde el bróker, estos se guardan como un archivo en Excel en una determinada ubicación del equipo. Este archivo puede ser llamado desde Matlab por medio de la función “*readvars(feeds.xlsx)*” que incorpora el archivo xlsx a la carpeta de trabajo en Matlab. Es posible obtener los datos de tiempo, campos de potencia y corriente mediante la estructura:

```
[tiempo,indices,campopotencia,campocorriente]=readvars(feeds.xlsx)”
```

Dicha estructura separa en vectores a las columnas del archivo en Excel en formato “*string*”. En la figura 44 se muestra el diagrama de flujo para identificación de los datos almacenados en el archivo feeds descargado desde ThingSpeak. Estos valores se almacenan en arreglos independientes para su identificación y evaluación de forma independiente.

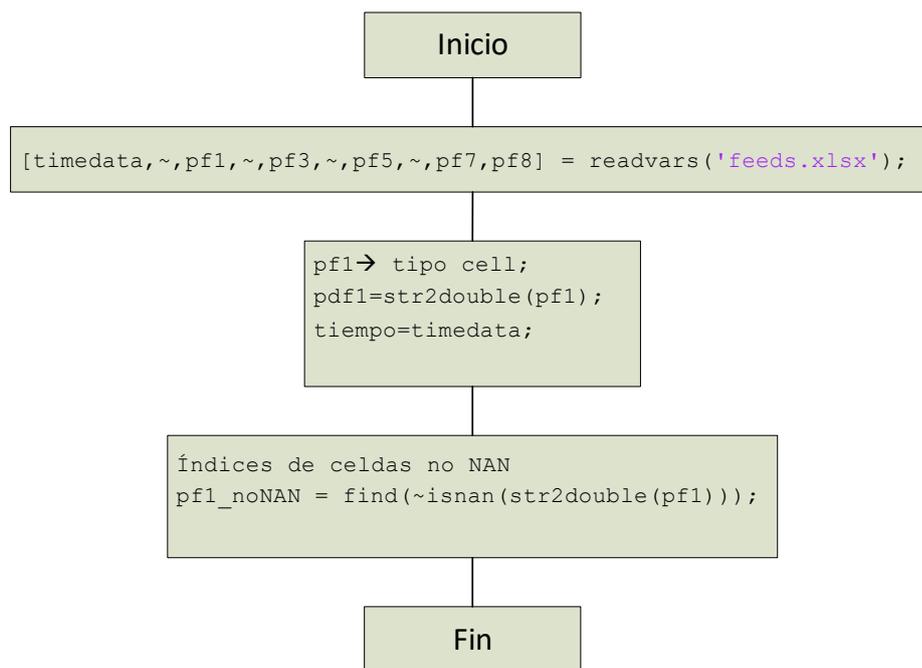


Figura 44. Identificación de los datos exportados y búsqueda de los valores no NAN.

Fuente: Elaborado por el autor.

Los datos se convierten de cadena a valores numéricos de punto flotante de doble precisión y posteriormente se busca, dentro de cada vector, los índices correspondientes para los valores no NAN y se almacenan dentro de la variable asignada para cada corriente y potencia de las celdas generadas.

3.10.2 Interpolación lineal en la aproximación de valores faltantes

Los índices que se guardan en la variable “*pfl_noNAN*” contienen los índices de las celdas que alojan valores existentes mientras que, los valores no existentes se almacenan como cadenas vacías. Para poder obtener la potencia y energía de la vivienda y de cada carga es necesario completar los valores de celdas inexistentes y para ello se emplea la interpolación lineal.

La interpolación lineal puede definirse como un método de aproximación de valores faltantes dentro de un conjunto, en función de datos existentes dentro del mismo conjunto. La potencia, para el escenario planteado, es una función lineal dependiente únicamente, del valor variable de la corriente y sigue una tendencia lineal de incremento o decremento marcada por su variable independiente. Un modelo básico de la interpolación lineal puede expresarse como se muestra en la ecuación 17:

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) \quad [17]$$

Como se puede observar en la ecuación, la interpolación es una función lineal entre dos puntos. En el contexto del escenario delimitado, se puede modificar a la ecuación 18 para obtener la ecuación 18 de la interpolación en tiempos discretos:

$$P_{interp} = P_1 + \frac{P_2 - P_1}{T_2 - T_1} \cdot (T - T_1) \quad [18]$$

Donde:

T : Tiempo de muestreo.

P_{interp} : Potencia interpolada para el valor faltante.

T_2 : *Tiempo 2 correspondiente a P_2*

T_1 : *Tiempo 2 correspondiente a 1*

P_2 : *Valor de potencia 2 correspondiente a T_2*

P_1 : *Valor de potencia 2 correspondiente a T_1*

Dado que el conjunto de datos consta con 15,854 filas de datos, es necesario agilizar el proceso de interpolación y para ello se emplean las funciones proporcionadas por Matlab, como “*interp1()*”. La función:

interp1(X, V, XQ, method, extrapolation)

Requiere de datos:

X: Índices de muestra.

V: Valores correspondientes en los índices x.

Method: Empleo del método para la interpolación.

Extrapolation: Permite evaluar valores que están fuera del dominio de x.

En la figura 45 se muestra el diagrama de flujo para la interpolación de los datos en Matlab, que es la extensión del diagrama presentado en la figura 41.

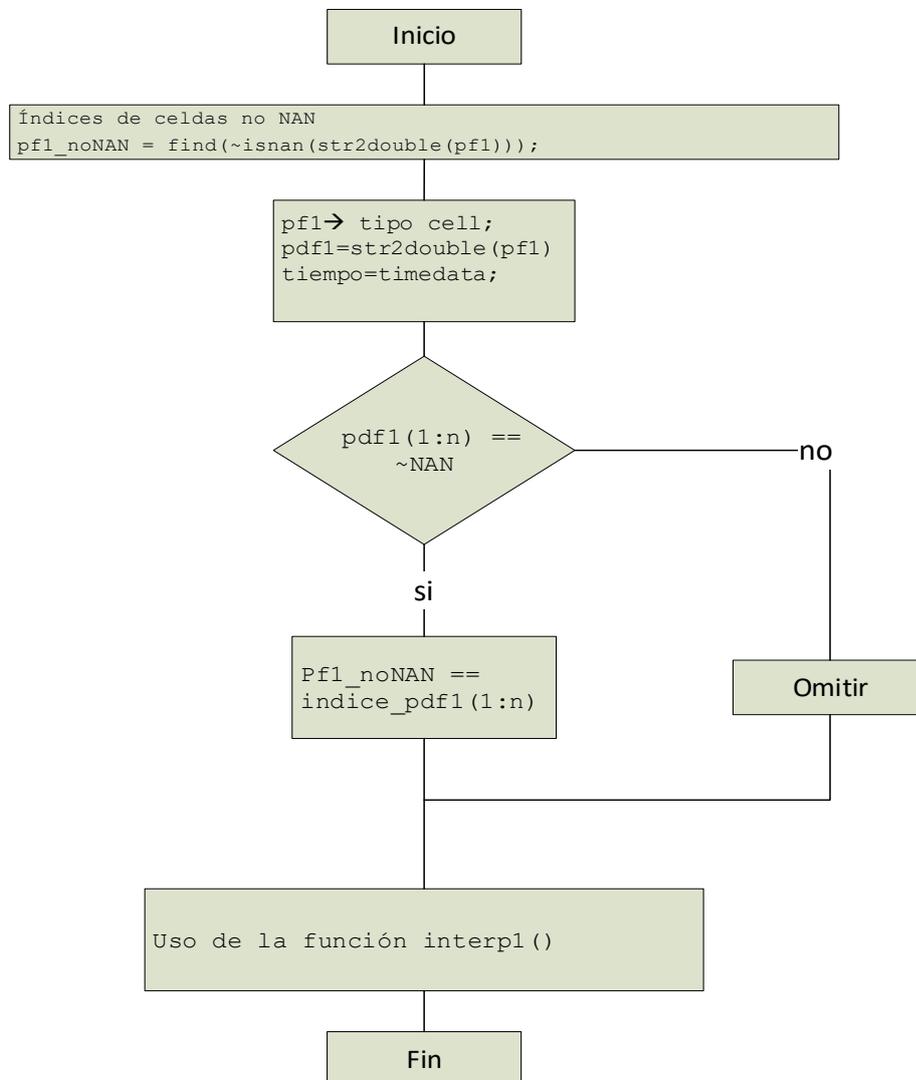


Figura 45. Identificación de los datos exportados y búsqueda de los valores no NAN.

Fuente: Elaborado por el autor.

3.11 Optimización energética por programación horaria basada en la regla de Pareto

La regla del 80/20 o conocida como “Ley de Pareto” fue creada por el académico parisino Vilfredo Pareto. En su obra “Cursos de economía política” (*Cours d'économie politique*) introdujo el concepto de la ley de ingresos proporcionales desiguales y determinó que aproximadamente el 80% de la riqueza estaba en manos del 20% de la población. La regla explica que: “*el 20% de las causas, siempre es responsable del 80% de los resultados*”, es decir, el 20% de cualquier cosa genera el 80% de resultados, mientras que el 80% restante de ese algo solo aporta con el 20% de los resultados. De esta forma, es posible concentrar los esfuerzos en el 20% de las causas para lograr obtener aproximadamente el 80% de los resultados de un problema [60].

Una de las herramientas de la regla del 80-20, es el diagrama de Pareto. Este diagrama está compuesto de un gráfico de barras que clasifica las causas ordenándolas de mayor a menor, con el fin de separar los aspectos significativos de los triviales en la solución de un problema. De esta forma se puede observar visualmente donde se requiere enfocar los esfuerzos para obtener el 80% de los resultados.

En [52], se emplea la regla de Pareto donde se establece que “*Sólo es necesario que el 20% de los equipos se mantengan con energía durante todo el día, el resto puede ser optimizado*”. Bajo esta consideración, se emplea el método de Pareto para determinar cuáles son las cargas no trasladables mientras que las demás pueden ser objeto de optimización por programación horaria.

En la figura 46, se muestra el diagrama de Pareto obtenido en base al perfil de energía consumida por las cargas de interés y la energía restante que no es objeto de medición. La energía restante la producen las cargas no trasladables y representa el 71% de la energía total consumida en la vivienda en el lapso medido. Por otra parte, la energía consumida por el televisor y el circuito de iluminación representa un total del 10% de dicha energía total consumida y que se encuentra por debajo del 20% del total. Por tanto, las cargas como el televisor, circuito de iluminación, lavadora y ventilador pueden ser objeto de optimización.

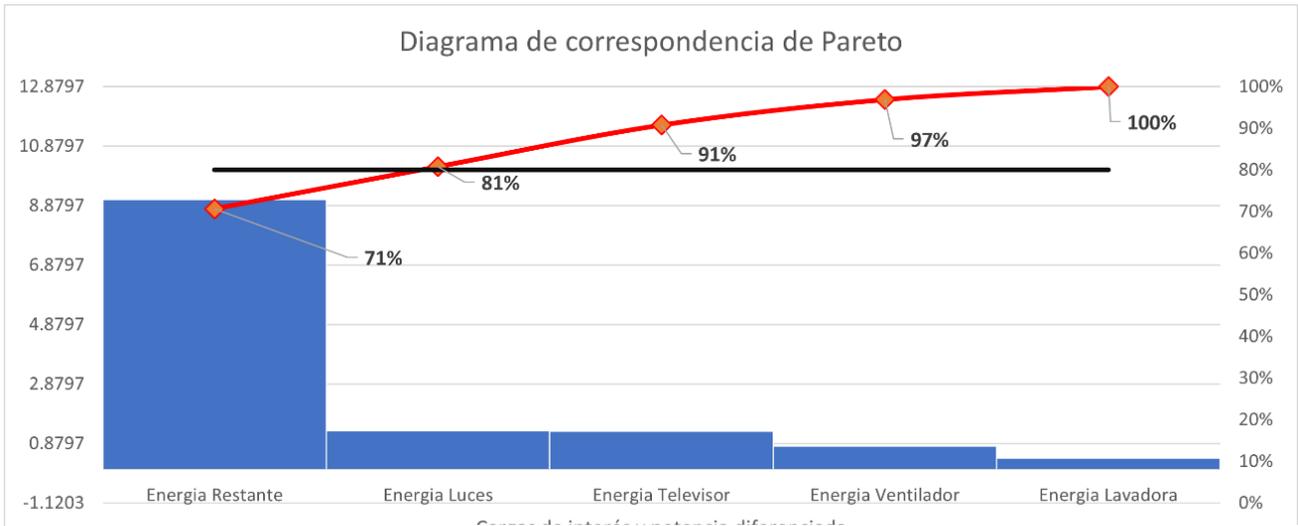


Figura 46. Diagrama de correspondencia de Pareto para el perfil de la energía de consumo por los equipos de interés y los demás electrodomésticos de la vivienda.

Fuente: Elaborado por el autor.

La función objetivo es la minimización del valor económico generado por el consumo de la energía del escenario descrito. Esta función objetivo depende únicamente de la energía consumida por la vivienda y la tarifa del valor de energía. La ecuación 19, representa la función objetivo que debe ser minimizada para obtener una reducción del valor generado por el consumo de energía.

$$V_G = \min \left(\sum_{i=0}^n E_i * Tf \right) + V_{ag} \quad [19]$$

Donde:

V_G : Valor económico generado por el consumo de energía del sistema o las cargas

E_i : Energía consumida por las cargas

Tf : Valor económico de la tarifa asignada por el proveedor del servicio eléctrico

V_{ag} : Valor económico agregado, correspondiente a la suma de los tributos municipales.

n : Carga de interés

3.11.1 Franja horaria

Tanto CNEL EP como la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) proporcionan varios consejos sobre el uso eficiente de la electricidad. Por ejemplo, en [61] se menciona que una de las formas para utilizar de forma responsable la electricidad es evitar el uso de electrodomésticos de alto consumo de energía en horarios de 6am a 9am y de 6pm a 10pm. De igual forma, en [62] CNEL expone que para fomentar el ahorro de energía y su uso responsable se debe evitar planchar en horas pico que van de 6pm a 10pm (en promedio una plancha eléctrica llega a consumir hasta 1200 vatios de forma cíclica hasta que llega a una temperatura fijada para luego mantenerse en espera a una disminución de la temperatura). Al seguir estos consejos se promueven buenos hábitos de consumo, se protege al medio ambiente y se obtiene un ahorro energético mensual para el consumidor.

Bajo estas consideraciones, se plantea la implementación de una franja horaria que va desde las 6pm a 10pm con el fin de obtener un ahorro energético dentro de la franja y contribuir al sistema de distribución, evitando la saturación de la red en horas pico, y al medio ambiente. De esta forma, la ecuación 20 establece la expresión matemática de la restricción para que, en la franja establecida no exista más de un equipo conectado a la red.

$$x \leq FH(t) \leq y \rightarrow \sum_{i=1}^n Eq_i \leq 1 \quad [20]$$

Donde:

x : *Equivalente al horario de 6pm*

y : *Equivalente al horario de 10pm*

$FH(t)$: *Franja horaria*

Eq_i : *Cargas de interés.*

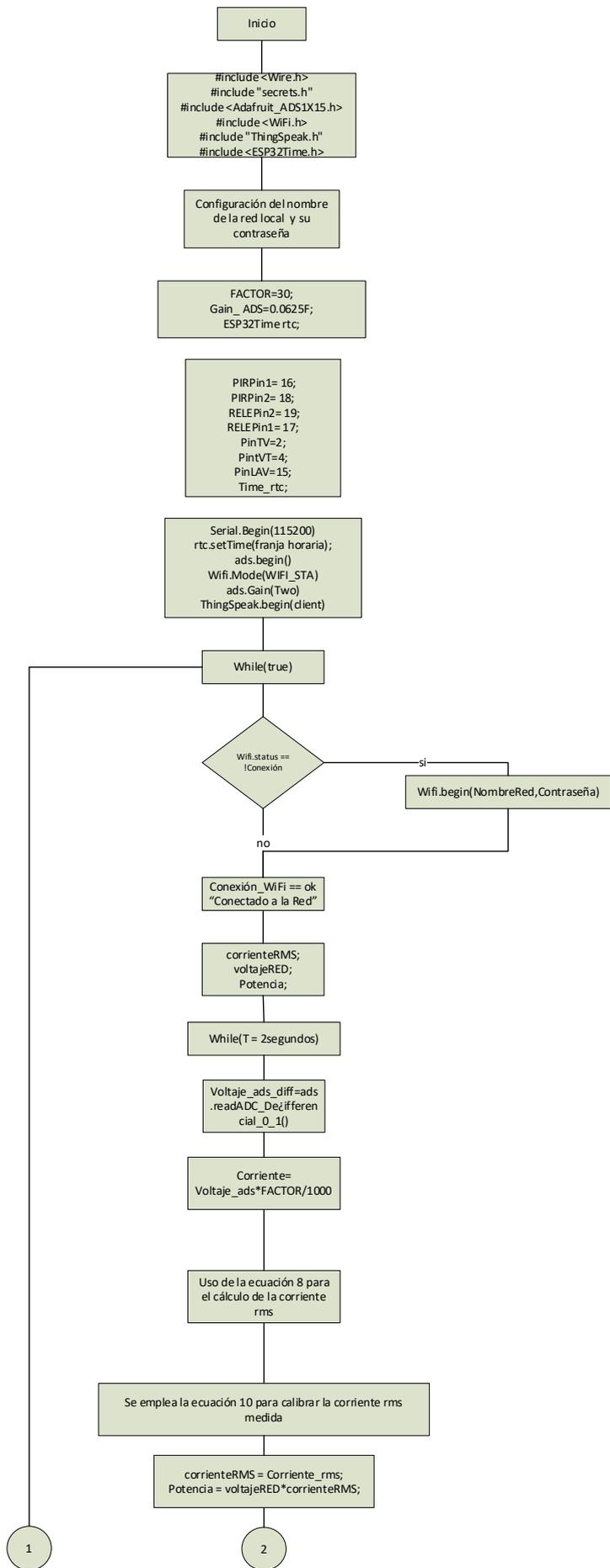
De esta forma, la ecuación 19 representa la función objetivo mientras que, la ecuación 20 su respectiva restricción. Obteniendo así, un problema en el que se requiere minimizar el coste del consumo energético con una única restricción en la que en dicha franja no exista más de una carga conectada a la red.

3.11.2 Programación de la franja horaria

La programación de la franja horaria se monta en la tarjeta ESP32 y se hace uso de la librería “ESP32Time.h”. Se declara una variable que guarde el tiempo real marcado por el ESP32 y el RTC, después se evalúa si se encuentra en el horario de 6PM y envía una señal para conmutar el estado, a normalmente abierto de los relés respectivos encargados del control de las cargas de interés. Posteriormente, continúa evaluando el tiempo hasta encontrar la hora 10PM y nuevamente conmuta su estado a normalmente cerrado (NC, por sus siglas en inglés).

Las cargas de interés que tienen programación por franjas horarias son el televisor, lavadora y ventilador de pedestal. Mientras que, el circuito de luces será controlado por los sensores PIR HC-SR501. Estos últimos están configurados para poder mantener la señal de salida que va hacia el relé, por un tiempo máximo de 5 minutos.

En la figura 47 se muestra la incorporación de las acciones de control al algoritmo mostrado en la figura 43 del diagrama de flujo para la programación de medición y control orientado a la optimización.



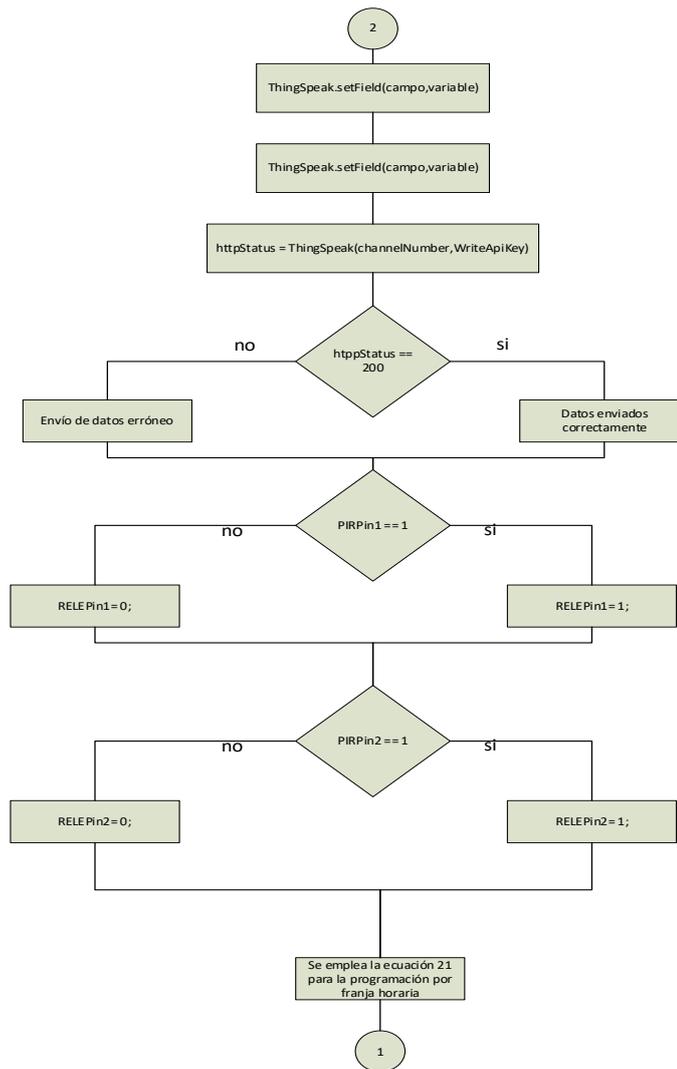


Figura 47. Diagrama de flujo para la programación de medición y programación horaria montada sobre la tarjeta ESP32

Fuente: Elaborado por el autor.

Como se puede observar del diagrama de flujo anterior, se declaran variables para el control del encendido de luces en el circuito de iluminación (RELEpin1, RELEPin2) y para el control de las cargas de interés PinTV, PinVT y PinLAV que corresponden al televisor, ventilador de pedestal y lavadora, respectivamente. Posterior a la verificación de envíos por parte de httpStatus, se inician las instrucciones condicionales que verifican la presencia en el dormitorio principal y baño y conforme a la hora programada cambia el estado en los pines de interés.

CAPITULO IV

4.1 Resultados del diseño de los módulos de monitoreo y control

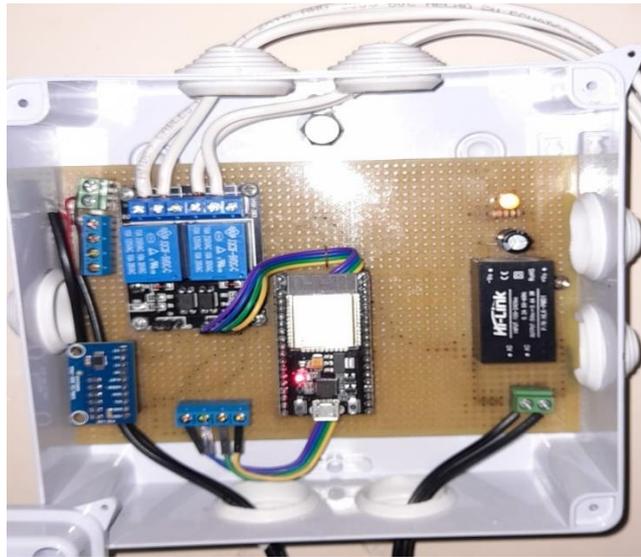
En la figura 48 se presentan los resultados del diseño generado para el monitoreo y control de las cargas trasladables y del monitoreo del tablero principal de la vivienda. Los módulos cuentan con alimentación de corriente alterna y solo los módulos de control cuentan con relés para el control on/off de las cargas. Las figuras muestran: (a) módulo de control del circuito de iluminación, ubicado en el cuarto de baño de la vivienda, (b) módulo de monitoreo del tablero principal, ubicado en la sala, (c) módulo de control para el televisor y ventilador, ubicado en el dormitorio principal y (d) módulo de monitoreo y control de la lavadora.



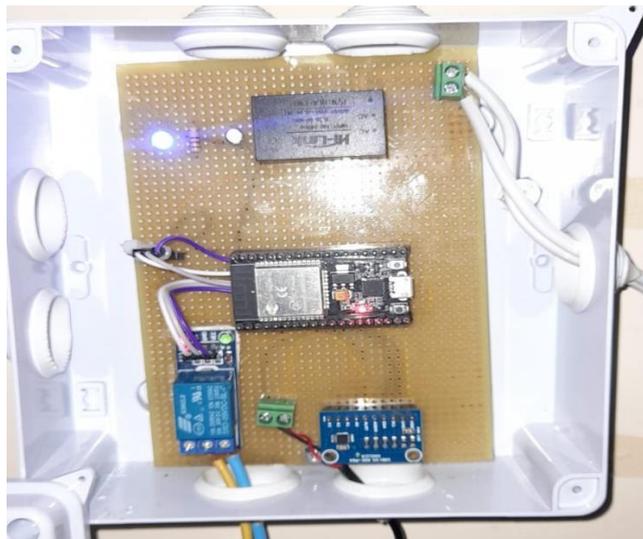
a) Módulo de monitoreo y control del circuito de iluminación.



b) Módulo de monitoreo del tablero de distribución principal.



c) Módulo de monitoreo y control de las cargas: Televisor y ventilador.



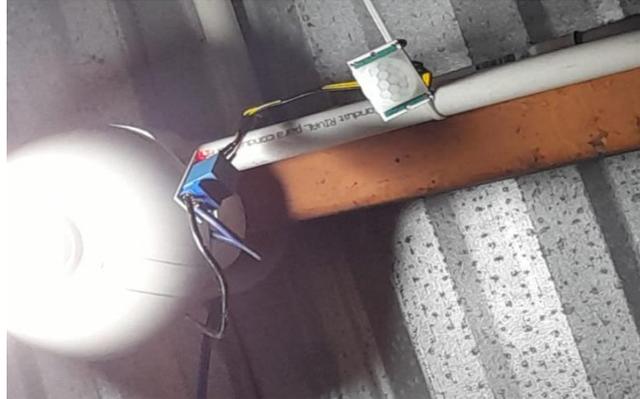
d) Módulo de monitoreo y control de la carga: lavadora.

Figura 48. Módulos de monitoreo y control para las cargas de interés dentro de la vivienda.

Fuente: Elaborado por el autor.

Por otra parte, en la figura 49 se observa la instalación del sensor PIR y el relé para el control de las luminarias. Desde el cuarto de baño, el módulo encargado evalúa la presencia tanto en el dormitorio como en el propio cuarto de baño, para el encendido de las cargas. La figura 49 (a) muestra la ubicación del sensor PIR y el relé en la habitación

principal mientras que, en la figura 49 (b) se puede observar el módulo relé y el sensor PIR para el control de la iluminación el en cuarto de baño.



a) Módulo relé y sensor PIR para el control de las luminarias de la habitación principal.



b) Módulo relé y sensor PIR para el control de la luminaria del cuarto de baño.

Figura 49. Detección de presencia por medio del sensor PIR y encendido de las cargas por medio de relés de un canal.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.2 Resultados de la medición de corriente por medio de la calibración del sensor SCT013-30

Conforme se detalla en el algoritmo para la determinación de la corriente rms de la figura 38 y cuyos resultados se muestran en la tabla 17, se emplea la función $polyfit(x,y,n)$ de Matlab para obtener los coeficientes de la función polinómica de ajuste, con los datos de la tabla 17. La ecuación 21 muestra la función polinómica de 4 grado obtenida para el ajuste de la corriente medida, donde c representa a la corriente rms obtenida del algoritmo de la figura 38.

$$f_{carac} = 0.039 c^4 - 1.3355 c^3 + 3.6422 c^2 + 3.8801 c - 0.0344 \quad [21]$$

Al evaluar esta ecuación con los datos de la tabla 17, se obtiene la curva de calibración para el sensor SCT013-30 obtenida en Matlab, que se muestra en la figura 53.

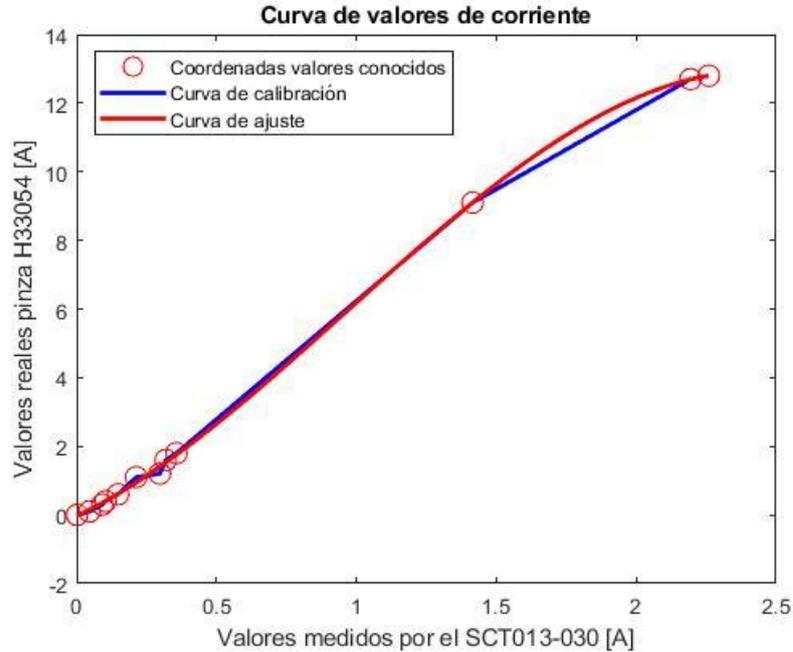


Figura 50. Curva de ajuste para la calibración de las mediciones.

Fuente: Elaborado por el autor.

En la tabla 19 se presenta el error absoluto de la interpolación realizada para la calibración del sensor. El ítem 8, resaltado en rojo, presenta el mayor error dentro de la calibración del sensor, con 0.2 A cuando se trata de medir valores de corriente que están cercanos a 1.2 A. Mientras que, el ítem 7, resaltado en verde, presenta menor error cuando se miden corrientes que se aproximan a 9.1 A, teniendo un error de 0.0024 A por medición. Adicionalmente se presenta el ítem 1 y 2, resultados en amarillo, que son el error absoluto de las mediciones obtenidas por el sensor cuando se evalúan corrientes de 0 A. El error en los ítems 1 y 2 es de 0.0277 y 0.0273 A respectivamente, lo que ocasiona que exista potencia consumida, vista en el bróker, cuando las cargas se encuentran desconectadas. El promedio de potencia enviado cuando se miden corrientes de 0 A es de 3.43 W.

Tabla 19. Error absoluto entre las mediciones interpoladas del SCT013-30 y las mediciones reales obtenidas de la pinza amperimétrica.

Ítem	Mediciones de Corriente [A]		
	SCT013-30 [A]	H33054 [A]	Error absoluto [A]
	Interpolados		
1	0.0277	0	0.0277
2	0.0273	0	0.0273
3	0.1505	0.1	0.0505
4	0.3492	0.3	0.0492
5	0.4042	0.4	0.0042
6	0.6159	0.6	0.0159
7	0.9436	1.1	0.1564
8	1.4061	1.2	0.2061
9	1.5300	1.6	0.0700
10	1.7542	1.8	0.0458
11	9.1024	9.1	0.0024
12	12.6926	12.7	0.0074
13	12.8062	12.8	0.0062

4.3 Resultados de la corriente y potencia enviada hacia el bróker

Los resultados de las mediciones de la corriente rms y el cálculo de la potencia son enviados hacia el bróker para su visualización y almacenamiento. En la figura 51 se observan los resultados de los datos enviados hacia sus respectivos campos en el bróker. El literal (a), de la figura 51, muestra la curva correspondiente al consumo de potencia de toda la vivienda. Las cargas no trasladables, conformadas por el grupo de equipos de refrigeración, ducha eléctrica, entre otros, son las que marcan el alza del consumo y los picos de la señal, esto debido al arranque del compresor y a su ciclo de operación. A medida que la curva de corriente disminuye también lo hace la potencia de la línea puesto que el ciclo de operación de las cargas no trasladables ha terminado.

En el literal (b) se presenta la curva de consumo de corriente y potencia del circuito de iluminación. Este circuito es controlado por los sensores PIR para su funcionamiento y en estado de ausencia de presencia, la señal se mantiene consumiendo 0.01 A, obtenidos por medio de la exportación de los datos. Cada aumento de la señal representa que los sensores han detectado presencia en el recinto y han hecho activar las luminarias. La señal de corriente y potencia se mantienen en alto, si los residentes se encuentran en movimiento dentro de los espacios designados con un consumo aproximado de 0.05 A.

Sin embargo, la señal aumenta cuando todas las luminarias se encuentran activas y generan un consumo de 0.1A medido con la pinza amperimétrica.

Por otra parte, el literal (c) muestra la curva de consumo de corriente y potencia de la lavadora. Se puede observar que el periodo evaluado la lavadora no ha tenido ninguna operación, sin embargo, se puede observar un consumo aproximado de 3.3W esto debido a que en la tabla 16 se muestra el error obtenido cuando se miden corrientes iguales a 0A.

Finalmente, en el literal (d) la curva de consumo de potencia tanto del ventilador de pedestal como del televisor. En la curva de la potencia de consumo del ventilador se puede observar que el ventilador entra en operación por un corto periodo, realizando una curva que se asemeja a una onda cuadrada. Por otra parte, en la gráfica de la curva de consumo de potencia del televisor, al igual que en caso de la curva de la lavadora, al no estar en operación tiene errores al tratar de medir corrientes de 0A.



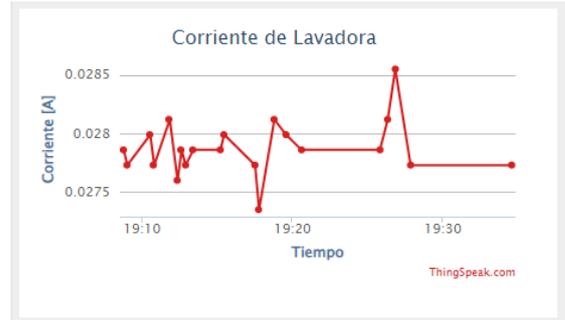
a). Gráficas del comportamiento de la corriente y potencia en el tablero de distribución.



b). Gráficas del comportamiento de la corriente y potencia del circuito de iluminación.



d). Gráficas del comportamiento de la potencia del ventilador y televisor.



c). Gráficas del comportamiento de la corriente y potencia de la lavadora.

Figura 51. Comportamiento de la corriente generada en Matlab.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.4 Resultados de la interpolación de los datos faltantes

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la interpolación de los datos faltantes realizada en Matlab. Los datos exportados desde ThingSpeak se muestran en la tabla 20, en ella se pueden evidenciar las celdas vacías ausentes de los respectivos valores de monitoreo, como corriente y potencia. Para la aproximación de los valores, por medio de interpolación lineal, se considera la ecuación 18 y se emplea la función de Matlab *interp1(X, V, XQ, Linear, Extrapolation)* donde se especifica el método de interpolación lineal por extrapolación, para que el algoritmo descrito en la figura 45 no omita los picos de la señal.

Tabla 20. Datos exportados desde el bróker con celdas vacías.

Fecha	Campo1	Campo2	Campo 3	Campo 4	Campo 5	Campo 6	Campo 7	Campo 8
13/7/20 23 8:57							58.72092	3.41754
13/7/20 23 8:57	70.18279	0.59985						
13/7/20 23 8:57			61.58362	0.52636				

13/7/20 23 8:58			61.39654	0.52476				
13/7/20 23 8:58							59.69334	3.58002
13/7/20 23 8:58			60.91957	0.52068				
13/7/20 23 8:58	69.58381	0.59473						
13/7/20 23 8:59							59.30558	3.73925
13/7/20 23 8:59			62.06447	0.53047				
13/7/20 23 8:59	63.59465	0.54354						
13/7/20 23 8:59			62.62917	0.53529				
13/7/20 23 9:00			62.91497	0.53773				
13/7/20 23 9:00			62.18336	0.53148				
13/7/20 23 9:00					3.20012	0.02735		
13/7/20 23 9:00			59.72384	0.51046				
13/7/20 23 9:01							59.21731	3.97241
13/7/20 23 9:01					3.22911	0.02760		
13/7/20 23 9:01					3.17211	0.02711		
13/7/20 23 9:01							58.00112	3.25159
13/7/20 23 9:02			60.54950	0.51752				

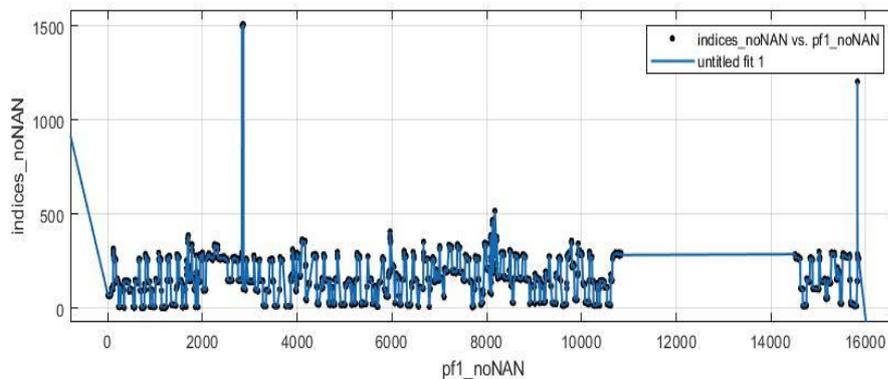
Los resultados de la extrapolación se almacenan en un archivo Excel. En la tabla 21 se puede evidenciar los resultados de la extrapolación para los mismos valores mostrados en la tabla 20.

Tabla 21. Resultado de los datos interpolados en Matlab.

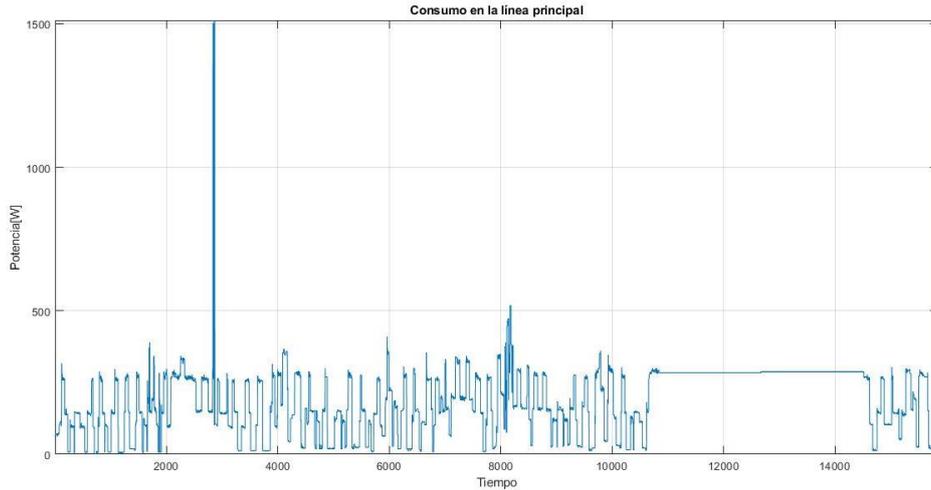
Fecha	Campo 1	Campo 2	Campo 3	Campo 4	Campo 5	Campo 6	Campo 7	Campo 8
13/7/2023 8:57	70.18279	0.59985	61.318615	0.524095	3.257202105	0.027836316	58.964025	3.45816
13/7/2023 8:57	70.18279	0.598826	61.58362	0.52636	3.252445263	0.027795789	59.20713	3.49878
13/7/2023 8:58	70.18279	0.597802	61.39654	0.52476	3.247688421	0.027755263	59.450235	3.5394
13/7/2023 8:58	69.58381	0.596778	61.158055	0.52272	3.242931579	0.027714737	59.69334	3.58002

13/7/2023 8:58	69.58381	0.595754	60.91957	0.52068	3.238174737	0.027674211	59.5640866 7	3.633096 667
13/7/2023 8:58	69.58381	0.59473	61.301203 33	0.5239433 33	3.233417895	0.027633684	59.4348333 3	3.686173 333
13/7/2023 8:59	69.58381	0.5776666 67	61.682836 67	0.5272066 67	3.228661053	0.027593158	59.30558	3.73925
13/7/2023 8:59	63.59465	0.5606033 33	62.06447	0.53047	3.223904211	0.027552632	59.2945462 5	3.768395
13/7/2023 8:59	63.59465	0.54354	62.34682	0.53288	3.219147368	0.027512105	59.2835125	3.79754
13/7/2023 8:59	63.59465	0.5466244 44	62.62917	0.53529	3.214390526	0.027471579	59.2724787 5	3.826685
13/7/2023 9:00	63.59465	0.5497088 89	62.91497	0.53773	3.209633684	0.027431053	59.261445	3.85583
13/7/2023 9:00	63.59465	0.5527933 33	62.18336	0.53148	3.204876842	0.027390526	59.2504112 5	3.884975
13/7/2023 9:00	63.59465	0.5558777 78	60.9536	0.52097	3.20012	0.02735	59.2393775	3.91412
13/7/2023 9:00	63.59465	0.5589622 22	59.72384	0.51046	3.209783333	0.027433333	59.2283437 5	3.943265
13/7/2023 9:01	63.59465	0.5620466 67	59.888972	0.511872	3.219446667	0.027516667	59.21731	3.97241
13/7/2023 9:01	63.59465	0.5651311 11	60.054104	0.513284	3.22911	0.0276	58.8119133 3	3.732136 667
13/7/2023 9:01	63.59465	0.5682155 56	60.219236	0.514696	3.17211	0.02711	58.4065166 7	3.491863 333
13/7/2023 9:01	70.09029	0.5713	60.384368	0.516108	3.1755825	0.02714	58.00112	3.25159
13/7/2023 9:02	70.09029	0.5743844 44	60.5495	0.51752	3.179055	0.02717	57.9934644 4	3.246903 889
13/7/2023 9:02	70.09029	0.5774688 89	60.97039	0.52111	3.1825275	0.0272	57.9858088 9	3.242217 778

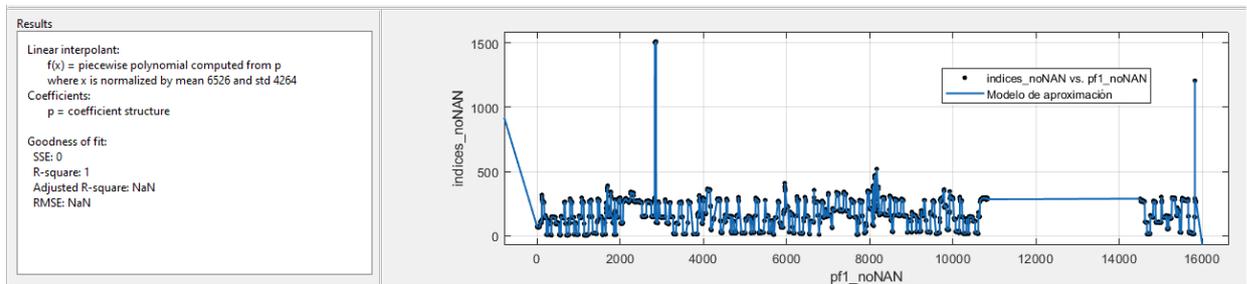
Por otra parte, Matlab proporciona la herramienta “Curve Fitting” donde es posible crear y validar los modelos de interpolación lineal, aproximaciones polinomiales, entre otras. En la figura 52 literal a) se presenta la curva obtenida por la herramienta Curve Fitting mientras que en el literal b) está la curva generada por interpolación mediante líneas de código. Finalmente, en c) se presenta el modelo de interpolación con el valor de R-cuadrado (R-square, por sus siglas en inglés), que es una medida estadística adimensional que expresa que tan bien se ajusta el modelo de datos interpolados.



a). Curva de la interpolación de los datos obtenidos en Curve Fitting.



b) Curva de la interpolación generada mediante la función interp1() en un script de Matlab.



c) Resultados obtenidos del modelo de aproximación en Curve fitting.

Figura 52. Gráfica de los valores interpolados a la derecha y su comparativa.

Fuente: Elaborado por el autor.

En la figura 53 se presentan las gráficas del consumo de potencia generados con los datos interpolados que se muestran en la tabla 17. En la gráfica del consumo de potencia de la línea principal, área color rojo, se presenta la curva de potencia consumida tanto de las cargas trasladables como de las no trasladables. Realiza dos picos bien marcados durante el tiempo de medición, con un valor que alcanza hasta los 1500W por cortos periodos. Dichos picos no coinciden con la operación de las cargas trasladables, por tanto, se presentan como picos de arranque de los compresores de las cargas no trasladables.

El consumo de la potencia del circuito de iluminación, área azul, está marcado por la operación de las luminarias, llevando un patrón de consumo durante el día de hasta 11 W. Sin embargo, se puede observar que en horarios de 6pm a 8pm consume hasta 80W para mantenerse después en 30 W hasta las 3am. Por otra parte, el consumo de potencia

de la lavadora, área en color verde, tiene baja recurrencia en su operación y en cortos periodos que llegan a alcanzar hasta los 400W en el arranque.

La gráfica del consumo de potencia de la lavadora funciona por cortos periodos, sin embargo, en el arranque del motor que la compone, genera altos valores que fácilmente alcanzan más de los 400W. En el perfil de consumo de potencia del televisor y el ventilador de pedestal tienen cierta correspondencia, esto debido a que están en el mismo recinto y tienden a encenderse en las mismas horas del día.

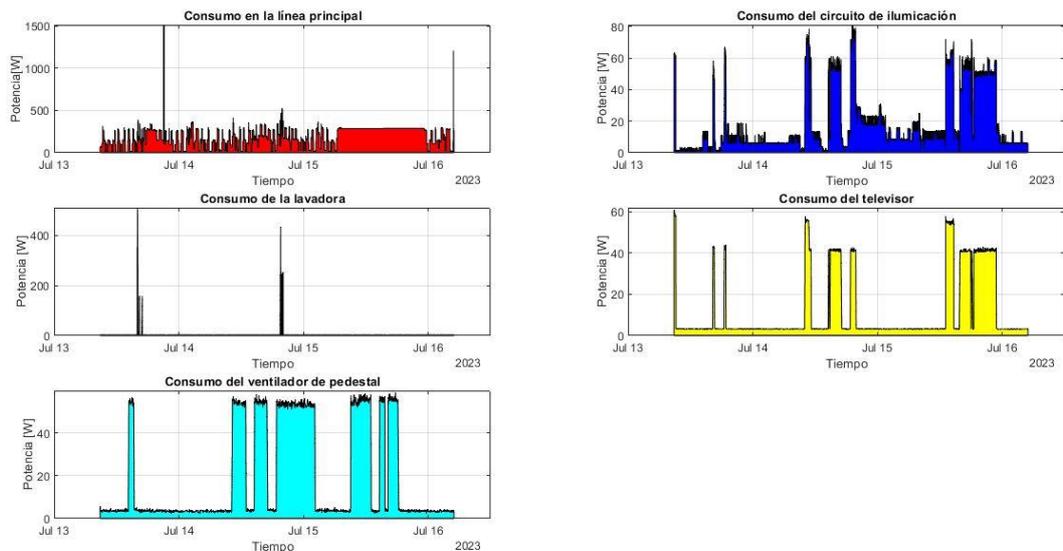


Figura 53. Comportamiento de la potencia de las cargas trasladables y del tablero de distribución.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.5 Resultados obtenidos en el cálculo de la energía consumida

En el apartado 3.3.4 se presentan 3 enfoques para el cálculo de la energía eléctrica consumida tanto por las cargas trasladables como por las cargas no trasladables. Se emplea el tercer enfoque para el cálculo de la energía. En la figura 54 se presenta el perfil de consumo de potencia y la energía acumulada en el periodo de medición. En el eje de izquierdo se muestran los valores correspondientes a la potencia para la señal medida, mientras que, en el eje derecho se muestra el valor de la energía consumida por la señal de potencia.

Como se puede observar en la figura 54, las características se asemejan a una onda cuadrada y los picos de la señal son debido a los ciclos de operación de las cargas no

trasladables y los arranques de sus compresores, respectivamente. El área de color azul representa la potencia consumida en el tiempo evaluado mientras que, la línea continua en color rojo es el consumo acumulativo de la energía para el periodo de medición. La energía consumida alcanzó los 12.88 KWh.

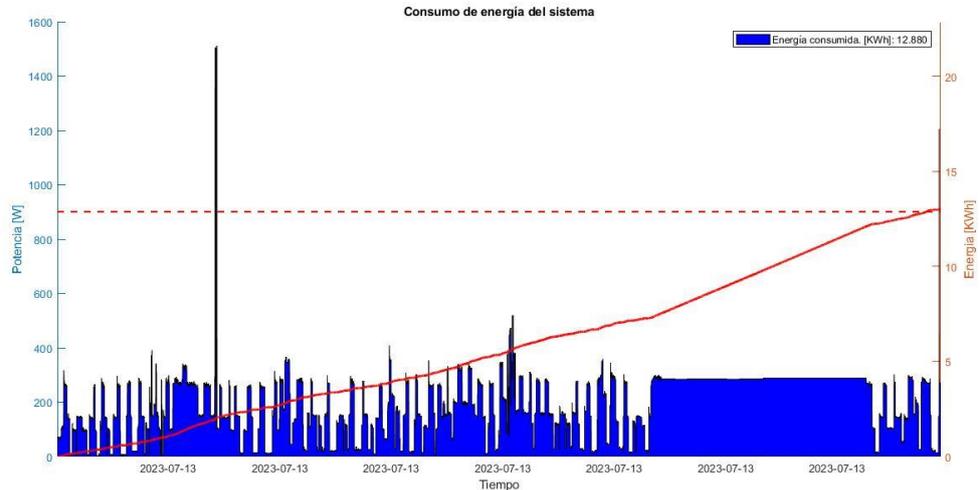


Figura 54. Energía consumida del sistema, en el periodo medido.

Fuente: Elaborado por el autor.

Por otra parte, en la figura 55 se presenta la energía consumida por la vivienda en 24 horas. El área de la región pintada de rojo representa el consumo de energía que experimenta la vivienda en la franja horaria de 6pm a 10pm. Hasta antes del inicio de la franja, el consumo sigue un patrón que es similar a una señal periódica, manteniendo por cortos tiempo el consumo de la potencia. Sin embargo, al iniciar la franja horaria el consumo no desciende por debajo de los 100Wh hasta el final de la franja. El mantener un determinado consumo de potencia por un largo periodo, sin que la potencia se comporte como una señal periódica, hace que la energía aumente por la cantidad de horas que permanezca sobre dicho valor.

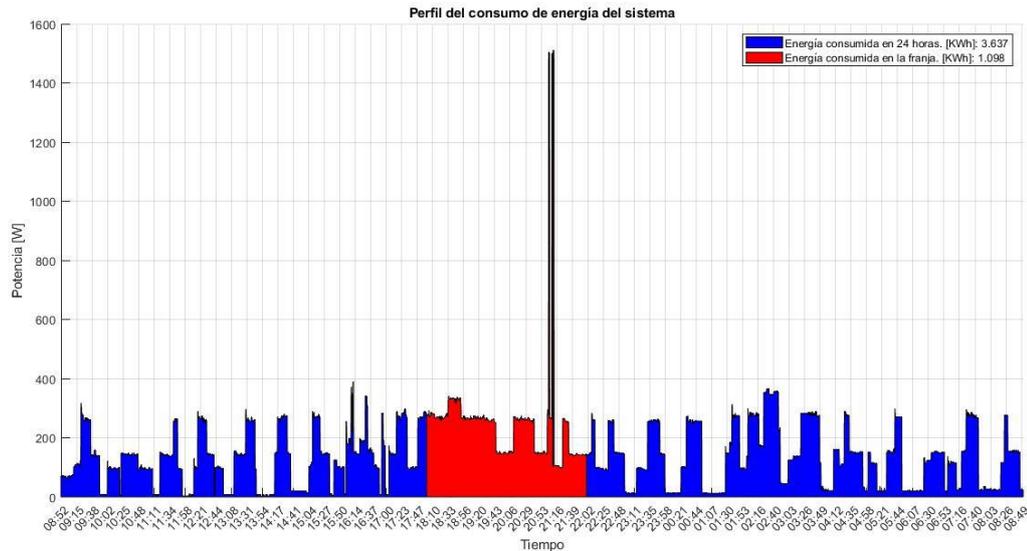


Figura 55. Energía consumida del sistema, medida en 24 horas.

Fuente: Elaborado por el autor.

De la figura 55 podemos extraer que la energía consumida en la franja horaria es de 1.098KWh y la energía consumida en las 24 horas que es de 3.637 KWh. Así la franja horaria representa el 30.19% del consumo en un día de medición.

4.6 Resultados de la optimización por programación de franja horaria y control de presencia

Se plantean dos escenarios para el análisis de la energía consumida por el sistema. El primer escenario contempla una aleatoriedad del consumo de las cargas de interés dentro de la franja de restricción considerando ítem 1 de la tabla 19 del error absoluto, obtenido al tratar de medir de corrientes de 0A y que produce una potencia de 3.43 W para cuando la carga se encuentra apagada o desconectada de la red.

Por otra parte, en el segundo escenario se asume que las cargas han permanecido encendidas con su potencia nominal de consumo, en la franja de interés, esto con el fin de determinar la influencia de las cargas, sobre la energía total consumida. En este caso, se considera que al estar apagado el equipo consume 0 A, medido por la pinza amperimétrica, lo que corresponde a un consumo de 0W.

En base a la ecuación 20, se genera el análisis de la energía consumida dentro de la franja horaria conforme al primer escenario. Las cargas podrán ser operables dentro de la franja por medio de etiquetas de relevancia definidas por el usuario. En la figura 56 se

muestra la operación de las cargas trasladables dentro de la restricción de la función objetivo en el primer escenario.

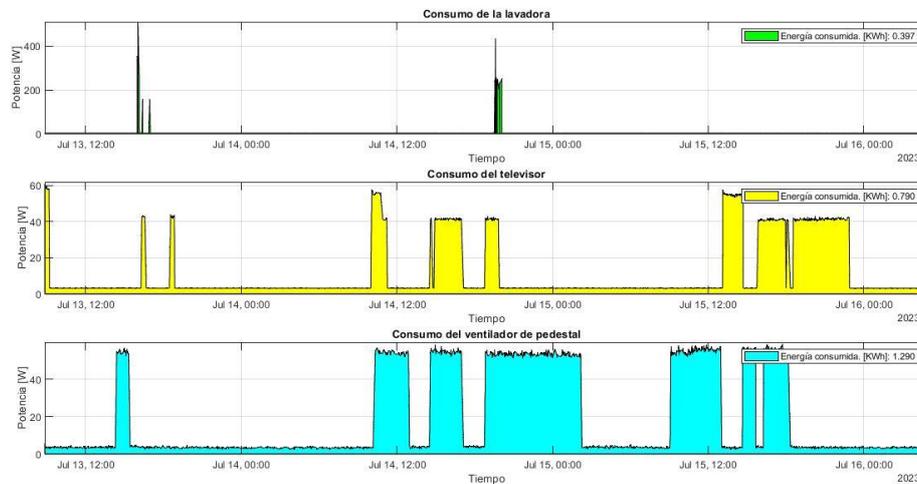


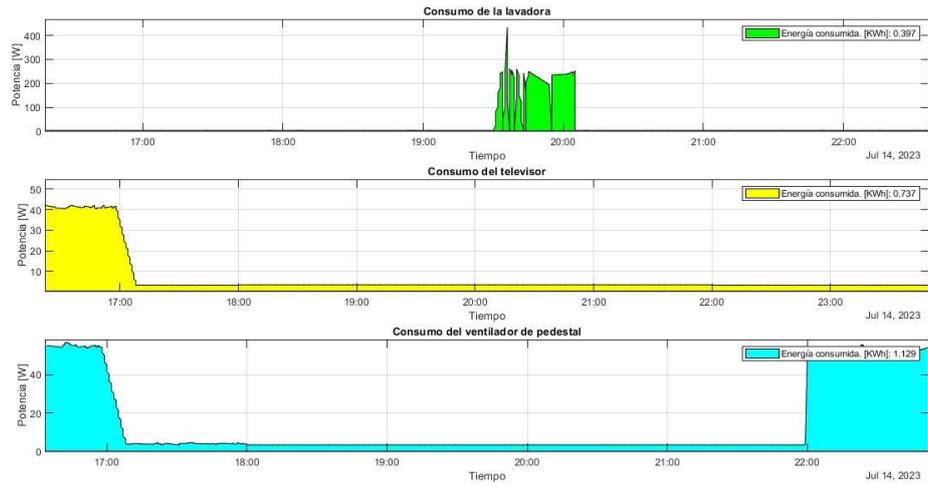
Figura 56. Operación de las cargas trasladables dentro de la franja horaria.

Fuente: Elaborado por el autor.

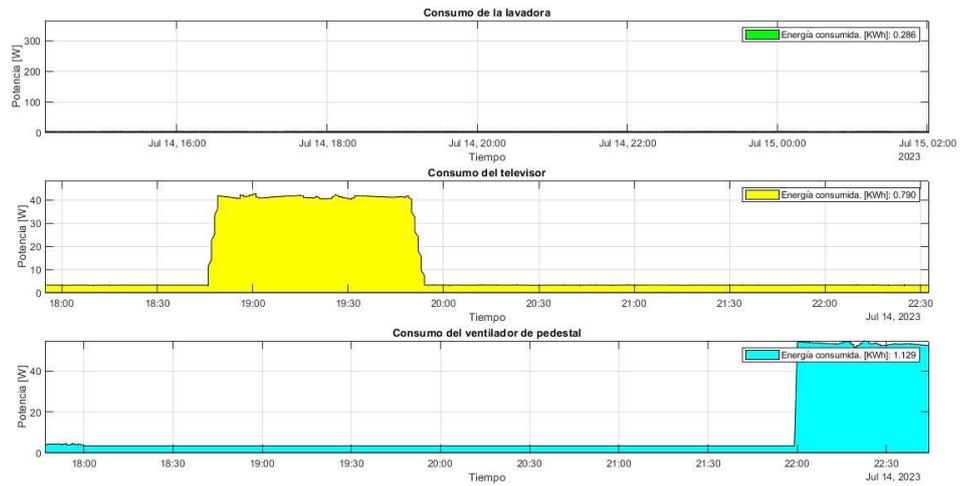
Por otra parte, en la figura 57 se muestra el consumo de energía de las cargas dentro de la franja horaria. En el literal (a) se muestra la operación de la lavadora, área color verde, dentro de la franja horaria mientras las cargas del televisor y ventilador son restringidas en base a la restricción de la función objetivo. En este escenario, la lavadora opera dentro de la restricción, con un consumo de 0.397 KWh, mientras el consumo del televisor y el ventilador es de 0.737 KWh y 1.129 KWh respectivamente.

En el literal (b) se observa el comportamiento del consumo de energía del televisor, área de color amarillo, cuando opera dentro de la franja de restricción. La lavadora y el ventilador cumplen con la restricción de accionamiento de una sola carga dentro de la franja delimitada. Aquí, el televisor consume 0.79 KWh mientras que, el consumo de la lavadora se reduce a 0.286 KWh y el ventilador se mantiene en 1.129 KWh de consumo.

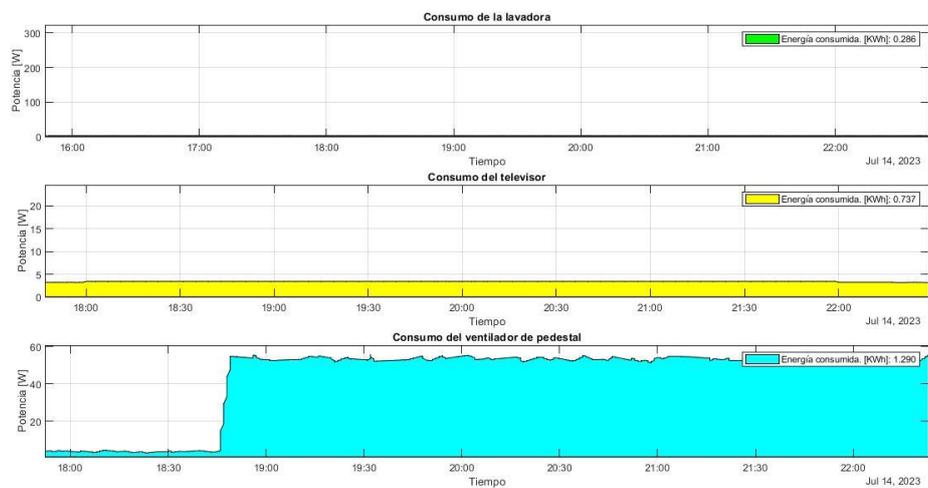
Finalmente, en la figura del literal c) es posible identificar la operación del ventilador mientras que las demás cargas cumplen con la restricción. En este caso, el ventilador pasa a consumir 1.29 KWh y el consumo de la lavadora y televisor se reduce a 0.286 KWh y 0.737 KWh respectivamente.



a) Operación de la lavadora dentro de la franja de restricción.



b) Operación del televisor dentro de la franja de restricción.



c) Operación del ventilador dentro de la franja de restricción.

Figura 57. Operación de las cargas trasladables dentro de la franja horaria.

Fuente: Elaborado por el autor.

En el segundo escenario planteado, se asume que las cargas de interés han permanecido encendidas durante la franja considerada como restricción. Así, presenta la figura 58 que muestra el consumo de potencia de cada carga trasladable durante el periodo establecido con las cargas trasladables funcionando dentro de la franja de restricción con su consumo nominal. Los valores asumidos para el consumo de las cargas dentro de la franja horaria corresponden a los descritos en la tabla 11 de los valores nominales de potencia de consumo.

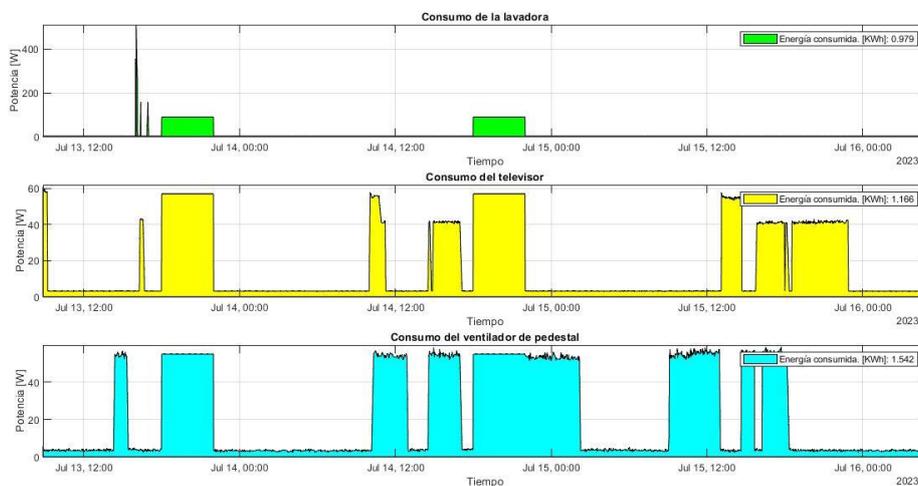


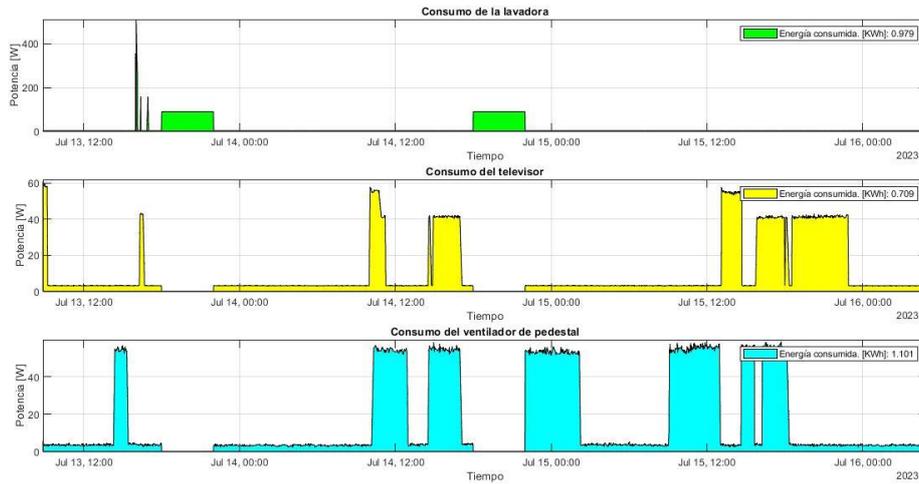
Figura 58. Consumo de potencia en el segundo escenario de validación.

Fuente: Elaborado por el autor.

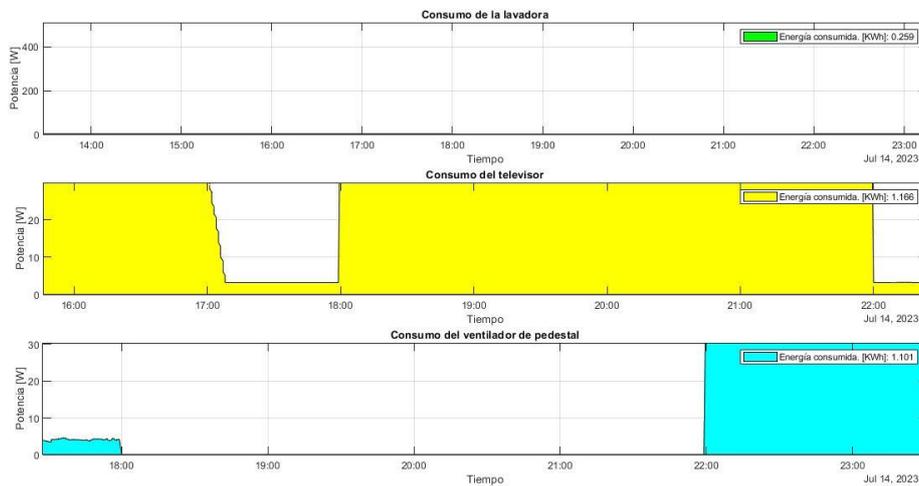
Los resultados del segundo escenario se presentan en la figura 59. El literal (a) de la figura 59, al igual que en el escenario 1, muestra cómo opera la lavadora dentro de la franja de restricción mientras las demás cargas trasladables cumplen con la restricción de la función objetivo considerando una potencia de 0W. El consumo que genera la carga dentro del periodo medido es de 0.98 KWh mientras que las demás cargas suman una energía de 1.8kW

El literal (b) muestra la operación del televisor dentro de la franja designa mientras las demás cargas son optimizadas. El consumo generado por la carga es de 1.17 KWh y la suma optimizada de las demás cargas es de 1.36 KWh.

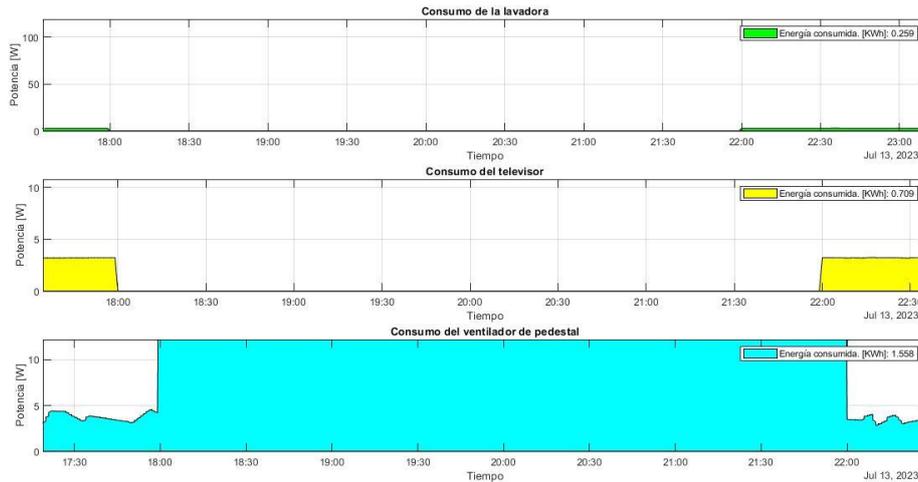
Finalmente, el literal (c) muestra el consumo generado cuando solamente se tiene conectado a la red eléctrica al ventilador mientras las cargas de interés son optimizadas dentro de la franja, restringiendo su conexión. El ventilador consume 1.56 KWh en el lapso de medición mientras que, la suma de la energía optimizada por las demás cargas de interés es de 0.97 KWh.



a) Resultado del escenario 2, operación de la lavadora dentro de la franja horaria.



a) Resultado del escenario 2, operación del televisor dentro de la franja horaria.



a) Resultado del escenario 2, operación del ventilador dentro de la franja horaria.

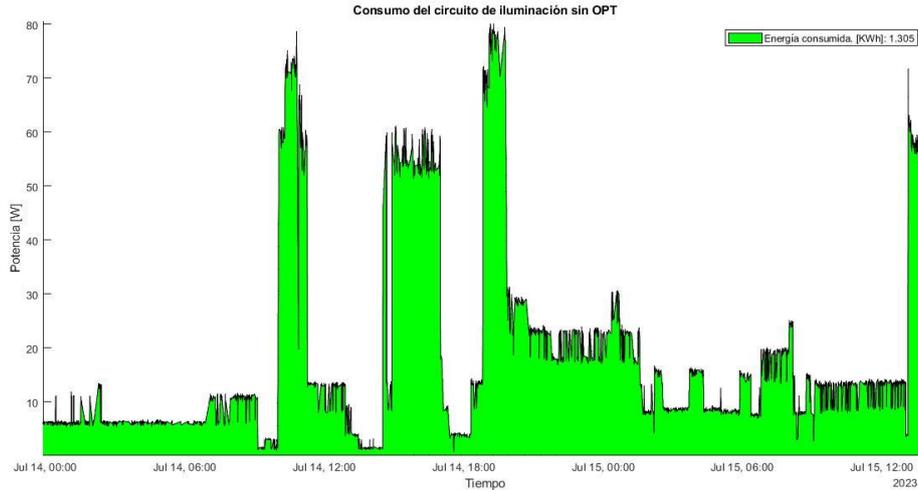
Figura 59. Consumo de energía de las cargas de interés en el escenario 2.

Fuente: Elaborado por el autor.

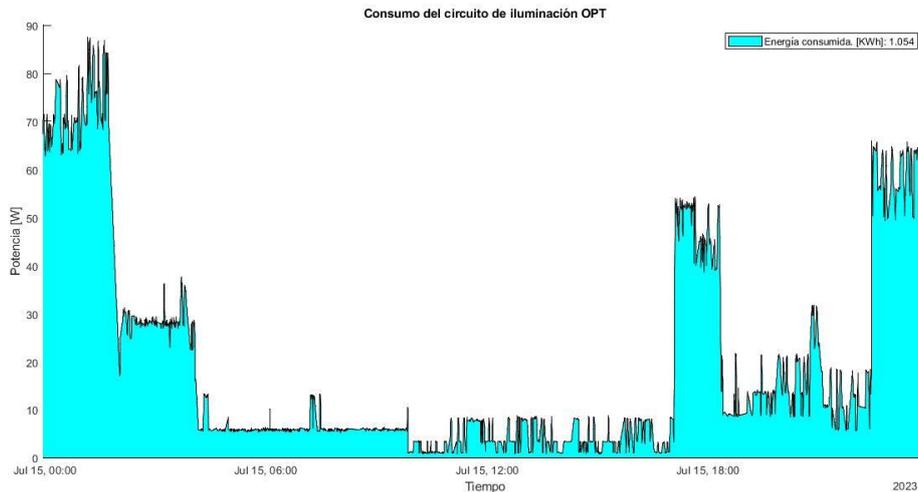
Puesto que, el error presente en el consumo, cuando se miden corrientes de 0A, resulta de potencia de consumo mayor a la esperada, debido a que la potencia no es 0W, se considera el segundo escenario como idóneo para el análisis de consumo de la residencia y cálculo del valor económico, mientras que, el primer escenario se toma como real.

En la figura 60 se muestra el consumo de potencia del circuito de iluminación dentro de la franja horaria establecida. En el literal (a), al inicio de la franja se observa un leve aumento de la potencia que después alcanza hasta los 80W. A partir de las 7pm se puede observar como la potencia genera picos que ascienden y descienden constantemente, esto debido al accionamiento de las luminarias dentro de la vivienda. Sin embargo, dos luminarias ubicadas en la sala no reciben acción de control de presencia por lo cual la potencia no desciende en su totalidad. Cuando las luminarias de la sala se encuentran funcionando solas marcan una potencia promedio de 6W vistos desde el bróker. El consumo en el circuito de iluminación con el sistema de detección de presencia es de 1.305 KWh para el periodo medido.

En el literal (b) puede observarse una disminución del consumo por parte de las luminarias esto debido al funcionamiento de las luminarias por acción de los sensores PIR. El cambio más notable es en el horario de 12pm a 6pm, que pasa a consumir potencia menor a 10W por mayor tiempo que en el literal (a).



(a). Consumo de energía del circuito de iluminación dentro de la franja horaria sin control de presencia



(b). Consumo de energía del circuito de iluminación dentro de la franja horaria con control de presencia.

Figura 60. Consumo de energía del circuito de iluminación

Fuente: Elaborado por el autor.

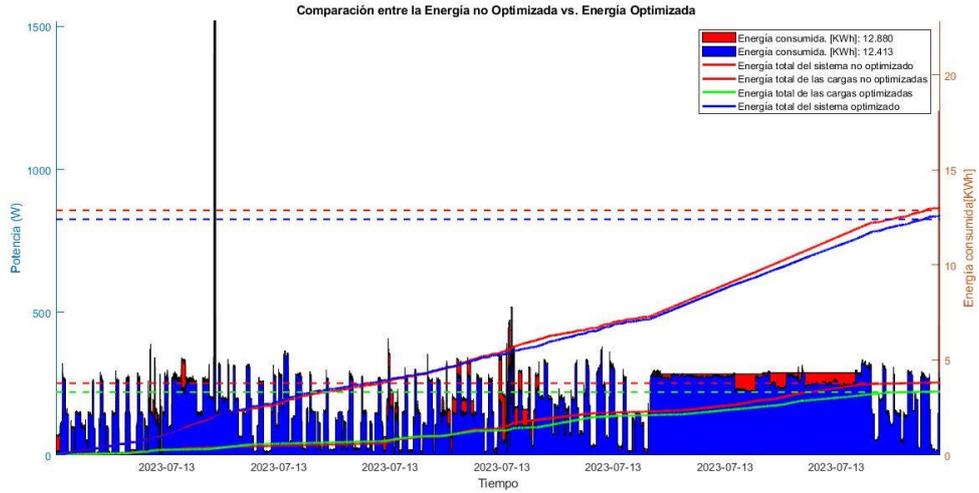
Conforme a la descripción de los escenarios, se presenta la figura 61 de la respuesta de la potencia total y energía consumida optimizada frente a la potencia y energía total del sistema sin optimizar, obtenida en base a la ecuación 20 de las restricciones de operación. En cada escenario se considera el control de presencia para el sistema de iluminación.

La figura 61 representa el primer escenario. Consta de dos ejes verticales, el primer eje, en azul, representa la potencia consumida por el sistema mientras que, el eje en color rojo representa la suma acumulativa de la energía para el periodo medido. Por otra parte, las líneas punteadas expresan el valor final de la energía acumulada para cada caso.

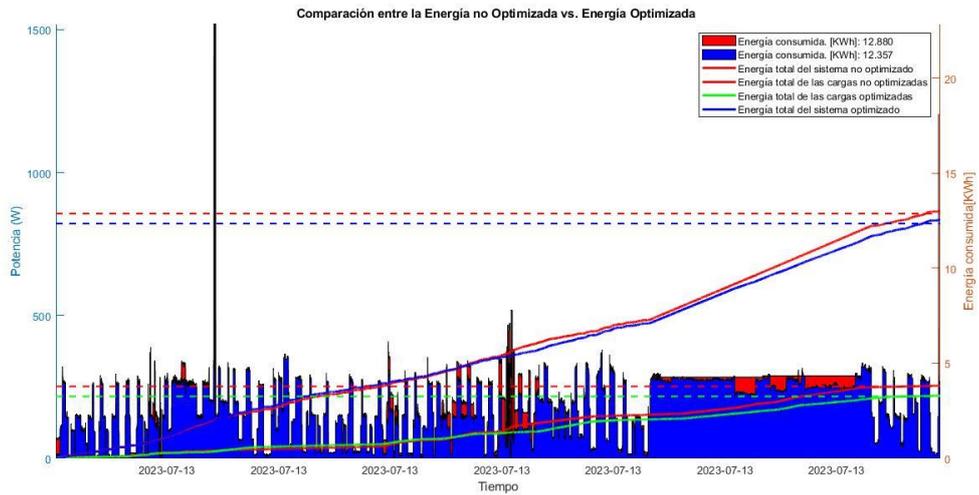
En el literal (a), se presenta el comportamiento de la potencia del sistema cuando solo opera la lavadora dentro de la franja designada más el control de las luminarias. Es posible observar que la energía del sistema sin optimizar es de 12.88 KWh mientras que la energía optimizada del sistema se reduce a 12.41 KWh presentando una disminución de 0.47 KWh por el periodo de medición. La representación del área en color rojo es la potencia sin optimizar mientras que el área coloreada en azul es la disminución generada por la restricción de la ecuación 20.

En el literal (b) puede observarse la disminución de la energía total del sistema tras la restricción de la franja horaria. La energía total del sistema pasa de 12.88 KWh a 12.357 KWh tras la programación horaria y la restricción de operabilidad. El resultado obtenido es debido a la operación del televisor dentro de la franja establecida sumado al control de la iluminación, logrando la reducción de la energía total de las cargas trasladables sin optimizar de 3.78 KWh a 3.64 KWh tras su optimización.

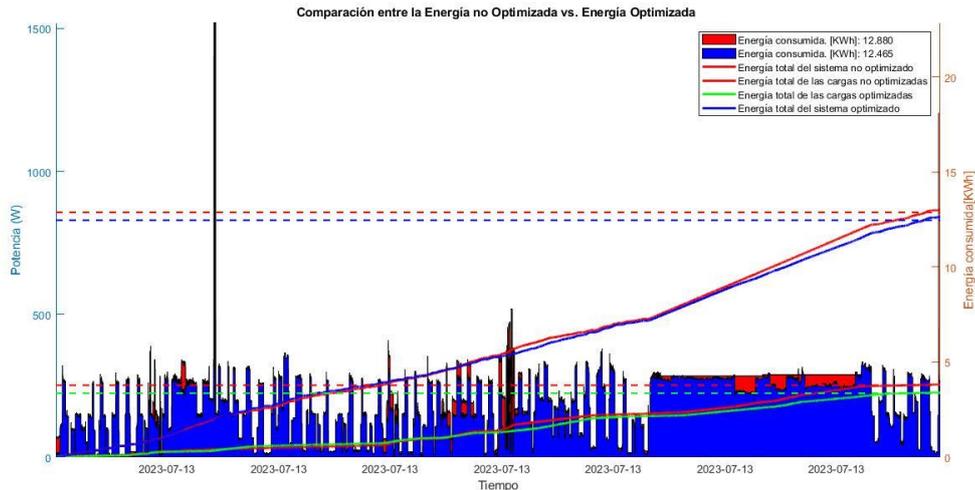
Finalmente, en la figura del literal (c) se puede observar el comportamiento de la energía total del sistema sin optimizar frente a la energía total optimizada, aplicando la restricción de la función objetivo cuando opera el ventilador y se tiene el control de presencia. La energía total del sistema tras la optimización disminuye de 12.88 KWh a 12.465 KWh con la operación del ventilador dentro de la franja establecida. Así mismo, la energía de las cargas de interés se reduce de 3.78 KWh a 3.64 KWh en el periodo medido.



a) Resultado de la optimización de la energía total del sistema con la operación de la lavadora dentro de la franja horaria.



b) Resultado de la optimización de la energía total del sistema con la operación del televisor dentro de la franja horaria.



c) Resultado de la optimización de la energía total del sistema con la operación del ventilador dentro de la franja horaria.

Figura 61. Resultado de la reducción del consumo de energía en base a la optimización de franja horaria.

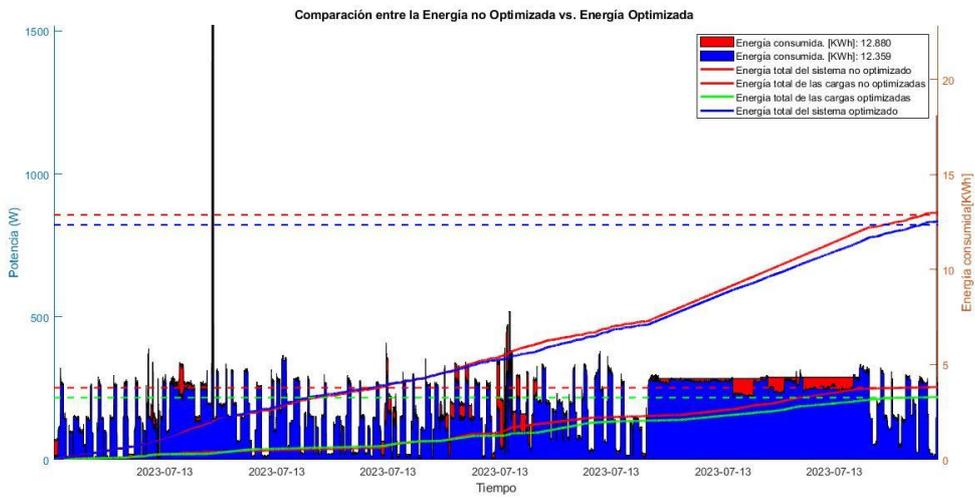
Fuente: Elaborado por el autor.

Conforme al escenario 2, la figura 25 presenta los resultados de la energía total del sistema optimizada en contraste con la energía optimizada, por la función objetivo y su respectiva restricción. Al igual que en el primer escenario, se adiciona el control de presencia en las luminarias.

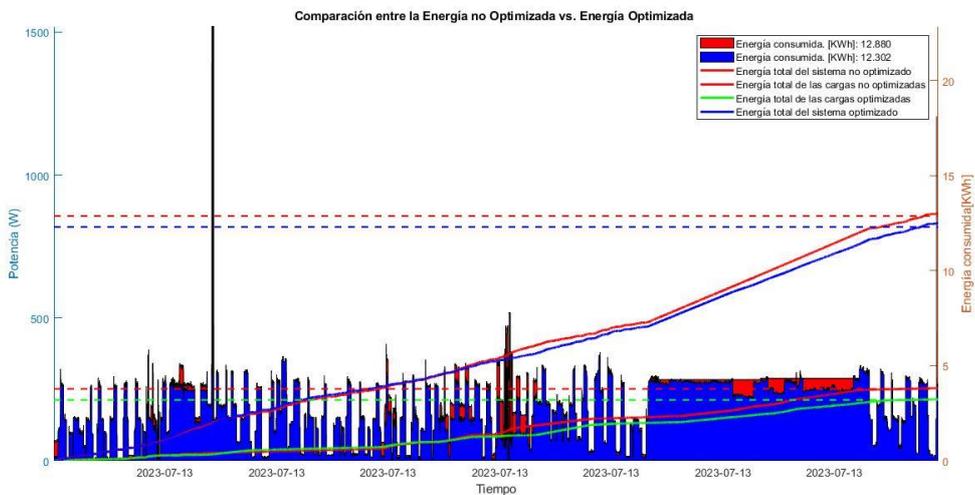
En la figura 62, se muestra en el apartado (a) las curvas de operación de la potencia y la suma acumulativa de la energía cuando la lavadora funciona bajo restricción y se añade el control de luminarias. Es evidente que la energía consumida por el sistema sin optimizar es de 12.88 KWh, mientras que, al optimizar el sistema, este consumo se reduce a 12.36 KWh, lo que representa una disminución de 0.52 KWh durante el periodo de medición. Esta reducción es incluso mayor que la observada en el primer escenario, alcanzando una disminución total de 0.22 KWh.

En el apartado (b), se puede apreciar una mejora en la disminución de la energía total del sistema después de aplicar la restricción en la franja horaria. La energía total del sistema disminuye de 12.88 KWh a 12.302 KWh tras implementar la programación horaria y la restricción de operabilidad. Este resultado se debe a que el televisor opera dentro de la franja horaria establecida, sumado al control de la iluminación, lo que logra reducir la energía total de las cargas trasladables sin optimizar de 3.78 KWh a 3.58 KWh después de su optimización.

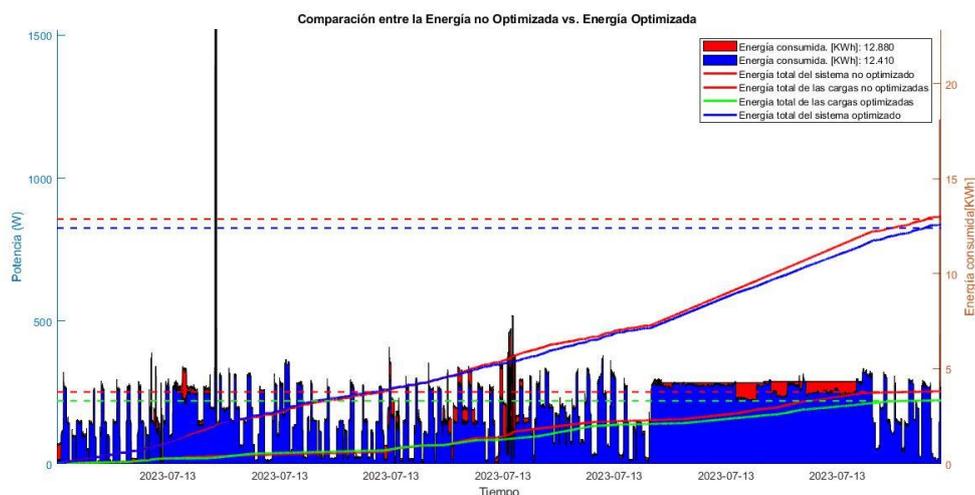
Finalmente, en la figura del apartado (c), se puede apreciar una mejora en el comportamiento de la energía total del sistema después de la optimización, al aplicar la restricción de la función objetivo durante la operación del ventilador y con el control de presencia. La energía total del sistema se reduce de 12.88 KWh a 12.41 KWh al operar el ventilador dentro de la franja horaria establecida. Además, la energía consumida por las cargas de interés disminuye de 3.78 KWh a 3.58 KWh durante el periodo medido. Estos resultados demuestran una eficiencia mejorada en el consumo energético del sistema gracias a las medidas de optimización implementadas y a la consideración de una correcta medida de corriente.



a) Resultado de la optimización de la energía total del sistema con la operación del ventilador dentro de la franja horaria del segundo escenario.



b) Resultado de la optimización de la energía total del sistema con la operación del televisor dentro de la franja horaria del segundo escenario.



b) Resultado de la optimización de la energía total del sistema con la operación del ventilador dentro de la franja horaria del segundo escenario.

Figura 62. Resultado de la reducción del consumo de energía en base a la optimización de franja horaria en el segundo escenario.

Fuente: Elaborado por el autor.

Los mejores resultados son obtenidos cuando se analiza el segundo escenario, con un promedio de optimización de 0.52 KWh, mientras que el promedio de eficiencia energética en el escenario uno es de 0.47 KWh. El promedio del segundo escenario presenta mayor eficiencia puesto que se evalúa para cuando se tiene corrientes de 0A y el promedio es 0W.

4.7 Resultados del precio de la energía consumida tras la optimización del sistema

Los valores generados por el consumo de energía se presentan en base a la ecuación 1, puesto que el periodo de medición es de aproximadamente 68.12 horas y al no completar el mes de medición no es posible emplear las ecuaciones 15 y 16 desarrolladas para obtener el consumo mensual por el concepto de la energía consumida.

En la figura 63, conforme al escenario 1, se presentan los resultados económicos generados dentro del periodo de medición.

La figura del literal (a) presenta el consumo de energía del sistema en el periodo establecido, frente al consumo optimizado con la operación de la lavadora dentro de la

franja establecida y el control de presencia para el sistema de iluminación. El aumento en la energía de las cargas de interés para el sistema optimizado radica en la consideración de que la lavadora ha consumido su potencia nominal, dentro de la restricción de la función objetivo. Sin embargo, el consumo de la vivienda es directamente proporcional al consumo de las cargas presentes y considerando que el sistema de iluminación representa el 10%, determinado en el diagrama de Pareto, del consumo de energía de la vivienda, al disminuir esta energía, disminuye también la energía total de la vivienda. En suma, en esta operación se tiene una eficiencia energética del 3.62% y un ahorro de 0.042 dólares.

En la figura del literal (b), cuando operan el televisor y se tiene el control de presencia para el sistema de iluminación, se obtiene una eficiencia del 4.06% que corresponden a 0.5232 KWh optimizada. El ahorro obtenido en esta operación es de 0.048 dólares.

Finalmente, en (c), se tiene una eficiencia energética del 3.22% cuando el ventilador funciona dentro de la restricción y se adiciona el control de presencia para el sistema de iluminación. La energía optimizada es de 0.42 KWh y se tiene un ahorro de 0.038 dólares.

En promedio, el sistema optimizado disminuye en 0.043 dólares el valor económico generado en el periodo de medición.

```

***** CONSUMO NO OPTIMIZADO *****
Horas de medición : 68.1167 Horas
Energía total del sistema: 12.88 Kwh
Energía total de las cargas de interés: 3.782 Kwh
Valor Kilovatio/hora: 0.091 $
Valor Económico, en dólares, de la energía consumida: 1.172 $
***** CONSUMO OPTIMIZADO *****
Horas de medición : 68.1167 Horas
Energía total del sistema: 12.41 KWh
Energía total de las cargas de interés: 3.178 KWh
Valor Kilovatio/hora: 0.091 $
Valor económico, en dólares, de la energía consumida: 1.13 $
***** AHORRO OBTENIDO *****
Energía optimizada: 0.4663 KWh
Porcentaje de ahorro energético generado: 3.62 %
Ahorro Obtenido en dólares: 0.042 $

```

a) Resultado económico de la optimización de la energía total del sistema con la operación de la lavadora dentro de la franja horaria.

```

***** CONSUMO NO OPTIMIZADO *****
Horas de medición : 68.1167 Horas
Energía total del sistema: 12.88 Kwh
Energía total de las cargas de interés: 3.782 Kwh
Valor Kilovatio/hora: 0.091 $
Valor Económico, en dólares, de la energía consumida: 1.172 $
***** CONSUMO OPTIMIZADO *****
Horas de medición : 68.1167 Horas
Energía total del sistema: 12.36 KWh
Energía total de las cargas de interés: 3.178 KWh
Valor Kilovatio/hora: 0.091 $
Valor económico, en dólares, de la energía consumida: 1.124 $
***** AHORRO OBTENIDO *****
Energía optimizada: 0.5232 KWh
Porcentaje de ahorro energético generado: 4.062 %
Ahorro Obtenido en dólares: 0.048 $

```

b) Resultado económico de la optimización de la energía total del sistema con la operación del televisor dentro de la franja horaria.

```

***** CONSUMO NO OPTIMIZADO *****
Horas de medición : 68.1167 Horas
Energía total del sistema: 12.88 Kwh
Energía total de las cargas de interés: 3.782 Kwh
Valor Kilovatio/hora: 0.091 $
Valor Económico, en dólares, de la energía consumida: 1.172 $
***** CONSUMO OPTIMIZADO *****
Horas de medición : 68.1167 Horas
Energía total del sistema: 12.46 KWh
Energía total de las cargas de interés: 3.178 KWh
Valor Kilovatio/hora: 0.091 $
Valor económico, en dólares, de la energía consumida: 1.134 $
***** AHORRO OBTENIDO *****
Energía optimizada: 0.4151 KWh
Porcentaje de ahorro energético generado: 3.223 %
Ahorro Obtenido en dólares: 0.038 $

```

c) Resultado económico de la optimización de la energía total del sistema con la operación del ventilador dentro de la franja horaria.

Figura 63. Resultado económico en base a la optimización por franja horaria.

Fuente: Elaborado por el autor.

A continuación, se presentan los resultados económicos generados por el escenario 2. La figura 64 muestra tanto los valores de energía consumida como los valores económicos generados por ellos.

En el ítem (a), cuando solamente opera la lavadora dentro del lapso restringido en conjunto con el sistema de detección de presencia para el sistema de iluminación, el consumo del sistema se reduce de 12.88 KWh a 12.36 KWh. Para el escenario se tiene una eficiencia del 4.05% correspondientes a 0.52 KWh optimizados. Se obtiene un ahorro de 0.047 dólares para el tiempo medido.

En el apartado (b), la operación del televisor dentro de la franja horaria programada junto con el sistema de iluminación resulta en una mejora significativa, reduciendo la energía total del sistema a 12.30 KWh, lo que implica una optimización de 0.58 KWh, equivalente al 4.48% de la energía. Esta mejora se traduce en un ahorro de 0.053 dólares para el período de tiempo medido.

La operación del ventilador dentro de la franja determinada junto con el sistema de iluminación se muestra en la figura del literal (c). Produce una disminución de la energía del sistema de 12.88 a 12.41 KWh que producen un ahorro energético del 3.65% correspondientes a 0.47 KWh que han sido optimizados. El ahorro obtenido es de 0.043 dólares considerando un sistema no optimizado.

```

***** CONSUMO NO OPTIMIZADO *****
Horas de medición : 68.1167 Horas
Energía total del sistema: 12.88 Kwh
Energía total de las cargas de interés: 3.782 Kwh
Valor Kilovatio/hora: 0.091 $
Valor Económico, en dólares, de la energía consumida: 1.172 $
***** CONSUMO OPTIMIZADO *****
Horas de medición : 68.1167 Horas
Energía total del sistema: 12.36 KWh
Energía total de las cargas de interés: 3.844 KWh
Valor Kilovatio/hora: 0.091 $
Valor económico, en dólares, de la energía consumida: 1.125 $
***** AHORRO OBTENIDO *****
Energía optimizada: 0.5212 KWh
Porcentaje de ahorro energético generado: 4.046 %
Ahorro Obtenido en dólares: 0.047 $

```

a) Resultado económico de la optimización de la energía total del sistema con la operación de la lavadora dentro de la franja horaria, en el segundo escenario.

```

***** CONSUMO NO OPTIMIZADO *****
Horas de medición : 68.1167 Horas
Energía total del sistema: 12.88 Kwh
Energía total de las cargas de interés: 3.782 Kwh
Valor Kilovatio/hora: 0.091 $
Valor Económico, en dólares, de la energía consumida: 1.172 $
***** CONSUMO OPTIMIZADO *****
Horas de medición : 68.1167 Horas
Energía total del sistema: 12.3 KWh
Energía total de las cargas de interés: 3.58 KWh
Valor Kilovatio/hora: 0.091 $
Valor económico, en dólares, de la energía consumida: 1.119 $
***** AHORRO OBTENIDO *****
Energía optimizada: 0.5781 KWh
Porcentaje de ahorro energético generado: 4.489 %
Ahorro Obtenido en dólares: 0.053 $

```

a) Resultado económico de la optimización de la energía total del sistema con la operación del televisor dentro de la franja horaria, en el segundo escenario.

```
***** CONSUMO NO OPTIMIZADO *****
Horas de medición : 68.1167 Horas
Energía total del sistema: 12.88 Kwh
Energía total de las cargas de interés: 3.782 Kwh
Valor Kilovatio/hora: 0.091 $
Valor Económico, en dólares, de la energía consumida: 1.172 $
***** CONSUMO OPTIMIZADO *****
Horas de medición : 68.1167 Horas
Energía total del sistema: 12.41 KWh
Energía total de las cargas de interés: 3.58 KWh
Valor Kilovatio/hora: 0.091 $
Valor económico, en dólares, de la energía consumida: 1.129 $
***** AHORRO OBTENIDO *****
Energía optimizada: 0.47 KWh
Porcentaje de ahorro energético generado: 3.649 %
Ahorro Obtenido en dólares: 0.043 $
```

c) Resultado económico de la optimización de la energía total del sistema con la operación del ventilador dentro de la franja horaria, en el segundo escenario.

Figura 64. Resultado económico en base a la optimización por franja horaria en el escenario 2.

Fuente: Elaborado por el autor.

El sistema optimizado en el escenario 2 muestra una mejora significativa al reducir en promedio 0.0477 dólares el valor económico generado durante el periodo de medición. Esta optimización se logra al considerar mediciones ideales, lo que permite un uso más eficiente de los recursos y una mayor eficacia en el rendimiento económico del sistema.

4.8 Pronóstico de consumo

Conforme al consumo generado, obtenido mediante el monitoreo de la red, se presenta el pronóstico del consumo de energía para un periodo de 31 días. El pronóstico fue realizado en base a la suma acumulativa de la energía, correspondiente a 68.1167 horas de monitoreo. En la figura 65 se muestra la energía acumulada del sistema cuando no se aplica la programación horaria, línea continua en color verde, para cada muestra obtenida.

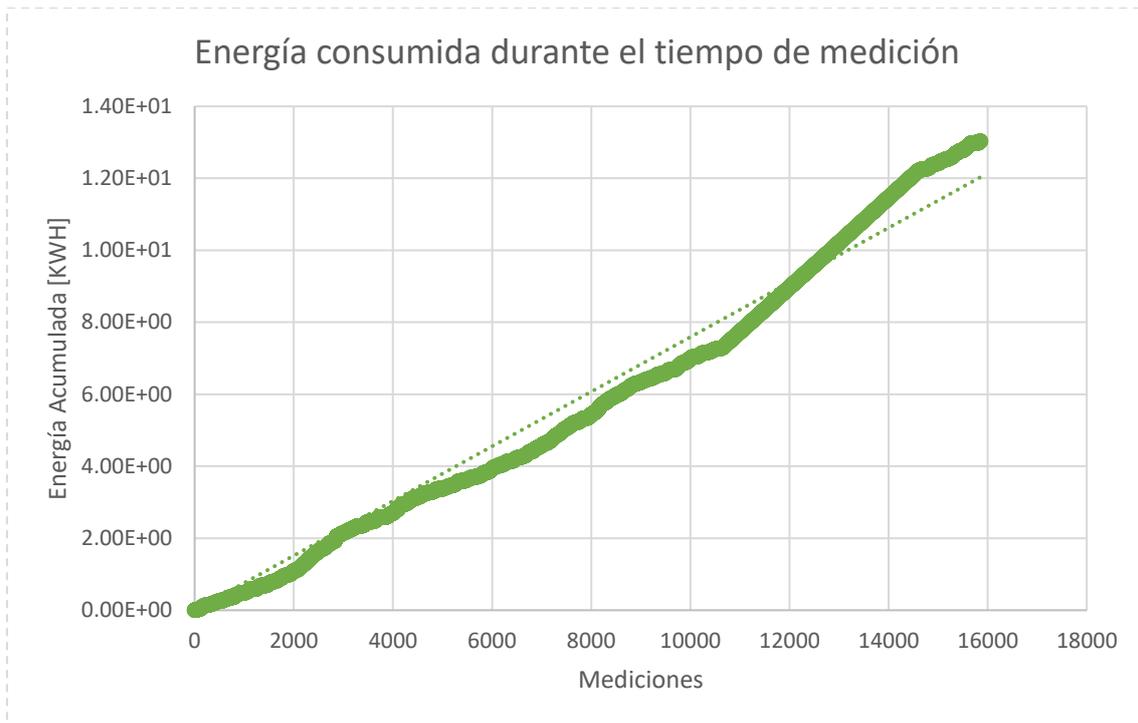


Figura 65. Proyección de la energía acumulada consumida por la vivienda cuando no se tiene programación de franja horaria.

Fuente: Elaborado por el autor.

Mientras que, la línea punteada representa una ecuación lineal de la tendencia de los datos. La ecuación [22] representa la recta de tendencia.

$$y1 = 0.0008 * x1 - 0.7099 \quad [22]$$

Donde :

$y1$: Energía correspondiente a la muestra evaluada

$x1$: Muestras respectivas de la energía acumulativa.

Al evaluar, con el uso de la ecuación 22, la energía para las primeras 68.1167 horas correspondientes a un total de 15854 muestras se tiene una energía total de 12.68 KWh mientras que, al término de las 748.2334 horas correspondientes a un aproximado de 31 días con un total de 174395 muestras, se obtiene una energía consumida de 139.52 KWh. Empleando la ecuación 16 para conocer el valor económico generado tras el consumo, se obtiene un valor aproximado de \$18.45 dólares.

Por otra parte, la figura 69 muestra la suma acumulativa de la energía total de la vivienda cuando se aplica la función objetivo para la optimización y su respectiva

restricción. Al igual que la figura anterior, la línea continua de color azul representa la suma acumulativa de la energía respecto a cada muestra dentro del tiempo de monitoreo. La línea punteada representa a la ecuación lineal para la proyección de la energía y la ecuación 23 corresponde a la recta de tendencia.

$$y_2 = 0.0008 * x_2 - 0.5898 \quad [23]$$

Donde :

y_2 : Energía total correspondiente a la muestra evaluada

x_2 : Muestras respectivas de la energía acumulativa.

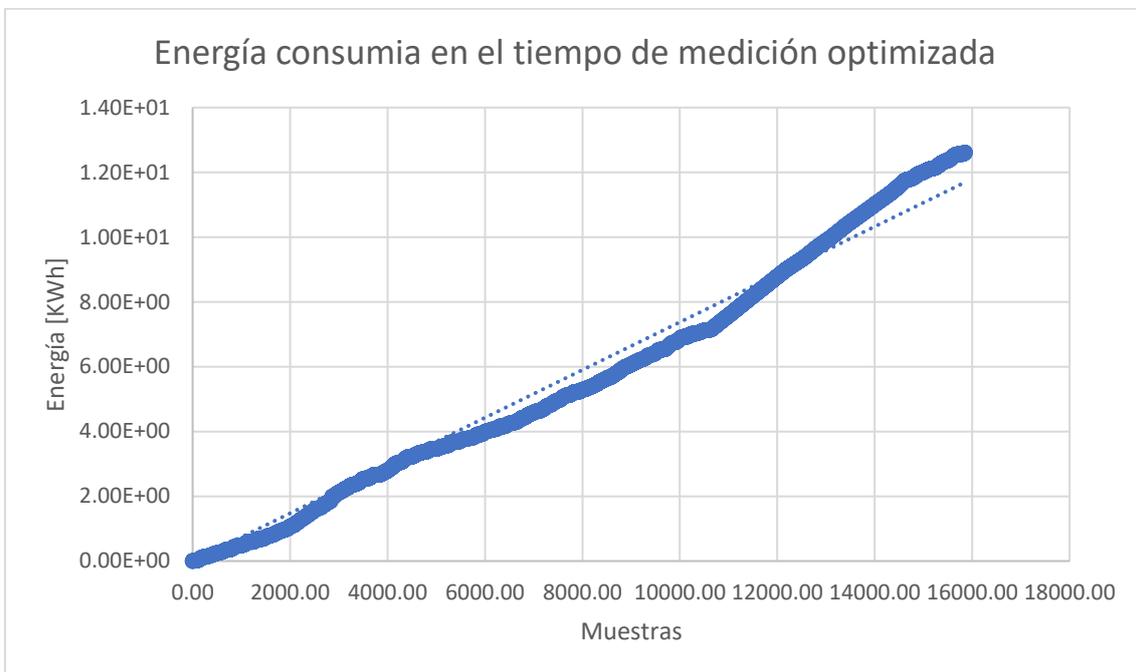


Figura 66. Proyección de la energía acumulada consumida por la vivienda por control de franja horaria.

Fuente: Elaborado por el autor.

Evaluando la ecuación 23 dentro de las primeras 68.1167 horas (15854 muestras) se obtiene un consumo de energía de 11.10 KWh. Al evaluar la ecuación 23 en 748.2334 horas (174395 muestras) que corresponde a un periodo de 31 días, se obtiene un consumo de 122.08 KWh con un valor total de \$ 13.02 dólares.

Finalmente, mediante la aplicación del control de franja horaria y el algoritmo del diagrama de Pareto, se determinan las cargas que producen una respuesta significativa, que en el escenario planteado son el circuito de iluminación y el televisor, para aplicarles acciones de control.

Mediante la proyección del perfil de consumo de energía, tanto para el sistema optimizado como sin optimizar, es posible evidenciar que, con la programación de los equipos para su funcionamiento dentro de la restricción, se produce una disminución del 12.5% de la energía consumida con un ahorro de \$ 5.43 dólares del valor total a pagar para la proyección de 31 días.

CAPITULO V

5.1 Conclusiones y Recomendaciones.

5.1.1 Conclusiones

El sistema de monitoreo y control de energía consumida dentro de la vivienda supervisa de forma adecuada a las cargas trasladables escogidas para el análisis. Dado que los módulos implementados están basados en elementos de bajo consumo de energía no se tiene un aumento significativo de la energía necesaria para su funcionamiento y, por ende, son óptimos para la implementación dentro de una vivienda.

Las cargas no trasladables, que para el escenario fueron 2 equipos de refrigeración, marcan el perfil de la energía consumida y debido a su operación cíclica y funcionamiento no pueden ser objeto de acciones de control. Sin embargo, por medio de la primera supervisión de estos equipos fue posible la observación de que éstos, operan fuera de sus valores nominales afectando así el consumo de la vivienda y su vida útil.

La topología de red del tipo estrella extendida, permite integrar más módulos de medición y control a los ya existentes logrando así llegar a más elementos que, bajo el diagrama de Pareto, puedan ser escogidos para acciones de programación horaria. Dentro de los módulos ADS1115 es posible conectar 4 sensores de corriente y tener alta resolución de las mediciones. Sin embargo, su incremento es proporcional a la cantidad de cálculos empleados lo que afectará directamente en el tiempo de máquina necesario para el cálculo de la corriente y potencia y su envío al bróker.

Debido a la latencia de la red y a la generación de los datos y su envío, se obtuvieron mediciones ausentes dentro de un conjunto de datos reales. Por medio del uso de interpolación de datos faltantes se aproximaron estos datos ausentes para su posterior análisis.

El algoritmo de la regla de Pareto en conjunto con el diagrama de Pareto permitió determinar cuáles son las cargas cuyo funcionamiento y operabilidad puede ser objeto de programación horaria. Por otra parte, la formulación de la función objetivo y su respectiva restricción proporcionan al sistema flexibilidad dentro del sistema de ahorro sin perder de vista el principal objetivo principal para la reducción del coste y de la energía consumida.

El ahorro energético resultante, en el periodo de medición de 68.11 horas y tras la aplicación de la regla de Pareto y control de iluminación por sensores de presencia, alcanza un promedio de 3.85% de la energía en el sistema sin optimizar con un valor económico promedio de ahorro de \$ 0.0428 dólares. Mientras que, en la proyección de consumo para 31 días aumenta al 12.5% con un ahorro económico proyectado de \$ 5.43 dólares por mes medido.

5.1.2 Recomendaciones

Dentro de los módulos empleados se considera el uso del sensor SCT013 para determinar la corriente rms de las cargas que son objeto de monitoreo. Uno de los problemas encontrados dentro del uso de este sensor es el tiempo de máquina generado para el escalamiento y normalización de la señal de voltaje obtenida. Debido a que debe generarse una función de calibración para que las lecturas obtenidas se ajusten al equipo de medición que sirve como contraste y que las funciones obtenidas al no ser lineales (en vista de que la función de calibración es de cuarto grado) sumado a que la plataforma de programación no es la idónea para el desarrollo de cálculos matemáticos puesto que se obtienen errores al medir corrientes que no están dentro de los datos de la calibración, se genera un tiempo de medición mayor para que se tomen más muestras y sea más preciso.

Sensores como el PZEM 004T están diseñados para determinar de manera directa el cálculo de la energía, corriente, voltaje, potencia y demás variables, dentro del mismo ambiente, evitando así la generación de una curva de calibración y un polinomio de ajuste. Sin embargo, se recomienda el uso de un equipo de contraste para determinar la fidelidad de las mediciones.

El sistema de monitoreo y control conformado por los elementos antes descritos tiene latencia en el envío de los datos hacia el nodo principal. Este retardo en la actualización de los datos, que se almacenan en ThingSpeak, genera pérdida de información. El tiempo de actualización de los campos es de 15 segundos esto sumado al tiempo de generación de los datos, se alcanza un lapso de actualización que, en pruebas, ha llegado desde 1 minuto hasta 5 minutos para la actualización del canal.

Implementar la codificación mediante el protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP, por sus siglas en inglés) disponible mediante el uso de librerías desde Arduino

IDE, puede reducir de gran manera la latencia en el envío de los datos puesto que hace publicaciones directamente en los canales manteniendo el código http 200 para la verificación correcta del envío de los datos.

Proporcionar al usuario una aplicación móvil que le permita realizar acciones POST o GET hacia los canales del bróker, para el control de las cargas de interés, la visualización de las curvas de consumo y que proporcione información sobre el valor económico generado tras el consumo de la energía.

Con el fin de contribuir con la red del sistema de distribución eléctrica y el medio ambiente, es posible establecer más franjas horarias bajo la misma función objetivo y restricción tal como lo menciona la EEQ una posible franja puede ser de 6am a 9am. Adicional, junto con la aplicación móvil, el sistema puede volverse mucho más flexible al permitirle al usuario establecer sus propias franjas horarias que se ajusten a sus hábitos de consumo.

Las cargas escogidas, dentro del escenario descrito, debido a su perfil de consumo y a su operación diaria, no generan tanto consumo lo que afecta en diferenciar de mejor manera el ahorro obtenido. Las cargas no trasladables marcan el perfil de consumo en la vivienda, por ser las cargas que tienen más tiempo de operación.

Contar con un adecuado diseño de los circuitos eléctricos y una correcta distribución de la aparamenta dentro del tablero de distribución mejora significativamente la instalación de los sistemas de monitoreo y posibilita el crecimiento de más nodos de monitoreo y control.

Cabe destacar que ningún método de control o algoritmo orientado a la eficiencia energética, será de utilidad si antes el usuario no cambia sus hábitos actuales de consumo. Hábitos como dejar las luces encendidas por largos periodos de tiempo lograrán que el usuario no perciba un ahorro económico y a nivel macro afectará al medio ambiente exigiendo al sistema de generación energía que eventualmente desperdiciará. Por tanto, es importante crear una conciencia de consumo energético responsable.

Bibliografía.

- [1] A. C. Swastika, R. Pramudita, y R. Hakimi, «IoT-based smart grid system design for smart home», en *2017 3rd International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*, jul. 2017, pp. 49-53. doi: 10.1109/ICWT.2017.8284137.
- [2] N. T. Surajudeen-Bakinde, S. O. Ayodele, N. T. Surajudeen-Bakinde, T. David Oloruntoba, A. O. Otuoze, y N. Faruk, «Development of an Internet based prepaid energy meter», en *2017 IEEE AFRICON*, sep. 2017, pp. 1370-1373. doi: 10.1109/AFRCON.2017.8095681.
- [3] P. Santhosh, A. K. S. Singh, M. Ajay, K. Gaayathry, H. S. Haran, y S. Gowtham, «IoT based Monitoring and Optimizing of Energy Utilization of Domestic and Industrial Loads», en *2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, may 2021, pp. 393-397. doi: 10.1109/ICICCS51141.2021.9432121.
- [4] K. T., C. R. S., J. D. N. J., y C. K., «Design of IoT based smart compact energy meter for monitoring and controlling the usage of energy and power quality issues with demand side management for a commercial building», *Sustain. Energy Grids Netw.*, vol. 26, p. 100454, jun. 2021, doi: 10.1016/j.segan.2021.100454.
- [5] S. Sarker, Md. A. Rakib, S. Islam, y S. S. Shafin, «An IoT-based Smart Grid Technology: Bidirectional Power Flow, Smart Energy Metering, and Home Automation», en *2021 International Conference on Maintenance and Intelligent Asset Management (ICMIAM)*, dic. 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICMIAM54662.2021.9715188.
- [6] D. F. Cevallos Troya, «DESARROLLO DE UN SISTEMA IOT PARA EL MONITOREO DEL CONSUMO ELÉCTRICO DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS DOMÉSTICOS DE MAYOR CONSUMO.», bachelorThesis, Quito, 2020. Accedido: 2 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uisrael.edu.ec/handle/47000/2605>
- [7] M. O. Agyeman, Z. Al-Waisi, y I. Hoxha, «Design and Implementation of an IoT-Based Energy Monitoring System for Managing Smart Homes», en *2019 Fourth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)*, jun. 2019, pp. 253-258. doi: 10.1109/FMEC.2019.8795363.
- [8] «Energía», *EJERCICIO DE LOS DERECHOS SOBRE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS EN EL ECUADOR*. <https://servicios.dpe.gob.ec/unidad-1-los-servicios-publicos-domiciliarios-y-sus-mecanismos-de-medicion/capitulo-2-delimitacion-del-sistema-de-estudio/estandares-e-indicadores/energia/> (accedido 21 de noviembre de 2022).
- [9] J. C. Muela Espinoza y J. S. Quishpe Gaibor, «La deontología aplicada a la política de costo de generación en el Ecuador», *Obs. Econ. Latinoam.*, n.º septiembre, sep. 2018, Accedido: 21 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.eumed.net/rev/oel/2018/09/deontologia-generacion-ecuador.html>
- [10] J. Quishpe Gaibor y J. Quishpe Freire, «Deontología aplicada al consumo de electricidad en hogares del Ecuador», *Caribeña Cienc. Soc.*, n.º septiembre, sep. 2018, Accedido: 21 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.eumed.net/rev/caribe/2018/09/deontologia-electricidad-ecuador.html>
- [11] R. Miceli, «Energy Management and Smart Grids», *Energies*, vol. 6, n.º 4, Art. n.º 4, abr. 2013, doi: 10.3390/en6042262.
- [12] L. E. Pereyra, *Metodología de la investigación*. Klik, 2022.
- [13] S. T. M. Daen, «Revista de Actualización Clínica Volumen 12», 2011.
- [14] G. Mousalli, *Métodos y Diseños de Investigación Cuantitativa*. 2015. doi: 10.13140/RG.2.1.2633.9446.
- [15] V. C. Mieles, «CNEL EP es la segunda mayor empresa pública del país», *CNEL EP*, 2 de octubre de 2019. <https://www.cnelep.gob.ec/cnel-ep-es-la-segunda-mejor-empresa-publica-del-pais/> (accedido 6 de enero de 2023).
- [16] «CNEL en Cifras», *CNEL EP*. <https://www.cnelep.gob.ec/cnel-en-cifras/> (accedido 22 de diciembre de 2022).

- [17] «Balance Energético Nacional 2019.pdf», *Google Docs*.
https://drive.google.com/file/d/1v1GWlJGk0eFf5mNSyuG9yDBY2nVzI3h_/view?usp=sharing&usp=embed_facebook (accedido 22 de diciembre de 2022).
- [18] «Balance Energético Nacional: En 2020 la demanda energética del país disminuyó – Instituto de Investigación Geológico y Energético».
<https://www.geoenergia.gob.ec/balance-energetico-nacional-en-2020-la-demanda-energetica-del-pais-disminuyo/> (accedido 6 de enero de 2023).
- [19] L. Pazmiño *et al.*, «Challenges and Opportunities of IoT Deployment in Ecuador», en *2019 International Conference on Information Systems and Software Technologies (ICI2ST)*, nov. 2019, pp. 108-115. doi: 10.1109/ICI2ST.2019.00022.
- [20] L. M. Amaya Fariño, A. R. Tumbaco Reyes, E. T. Roca Quirumbay, T. Villón González, B. M. Mendoza Morán, y Á. D. R. Reyes Quimís, «El IoT aplicado a la Domótica», 2020, Accedido: 6 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en:
<https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/7504>
- [21] D. G. Flores Tomalá y D. E. Sánchez Espinoza, «Sistema domótico por comando de voz basado en Arduino para personas con dificultades motrices», 2022, Accedido: 6 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/8235>
- [22] J. A. Zuluaga, «Diferencia de potencial y corriente eléctrica», 1980, Accedido: 16 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en:
<https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/1839>
- [23] F. BARRERO GONZALEZ, *Sistemas de energía eléctrica*. Ediciones Paraninfo, SA, 2004.
- [24] G. E. Harper, *Guía para el diseño de instalaciones eléctricas, residenciales, industriales y comerciales/Guide for Design of Residential, Industrial and Commercial Electrical Installations*. Editorial Limusa, 2005.
- [25] «Pliego Tarifario», *CNEL EP*. <https://www.cnelep.gob.ec/https-www-cnelep-gob-ec-wp-content-uploads-2022-05-pliego-tarifario-2022-rar/> (accedido 14 de diciembre de 2022).
- [26] M. d Ambiente, «Guía Práctica para el ahorro y el uso eficiente de energía». Recuperado el, 2017.
- [27] A. E. Escalante Malone, «Domótica: análisis y evaluaciones técnico - económicas de aplicaciones para la realidad nacional», *Univ. Piura*, nov. 2022, Accedido: 9 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/5713>
- [28] O. Q. Muñoz, *Internet de las Cosas (IoT)*. Ibukku LLC, 2019.
- [29] E. G. Moreno, *Automatización de procesos industriales*. Alfaomega Valencia, 2001.
- [30] L. S. Paz, «Automatización para la gestión eficiente de energía en el sector doméstico», *Rev. Electrónica Sobre Tecnol. Educ. Soc.*, vol. 4, n.º 7, Art. n.º 7, ene. 2017, Accedido: 26 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en:
<https://www.ctes.org.mx/index.php/ctes/article/view/647>
- [31] «Digitalización de energía: comprender y lograr una gestión activa de la energía en edificios Informe técnico | Schneider Electric».
https://www.se.com/ww/en/download/document/Buildings_WP503_EN/ (accedido 23 de febrero de 2023).
- [32] E. A. Herrera Heredia y A. S. Chávez Enríquez, «Diseño e Implementación de un Smart Meter de energía eléctrica enlazado en una plataforma de visualización para monitoreo y control del consumo energético domiciliario basado en IoT.[Presentación de Power Point]. Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPEC)». 2020.
- [33] «¿Qué es el Internet de las cosas (IoT)?» <https://www.oracle.com/mx/internet-of-things/what-is-iot/> (accedido 10 de febrero de 2023).
- [34] A. Cama-Pinto, E. De-La-Hoz-Franco, y D. Cama-Pinto, «Las redes de sensores inalámbricos y el Internet de las cosas», *INGE CUC*, oct. 2012, Accedido: 21 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11323/1546>
- [35] M. C. Acosta Ponce, «Estudio del estándar IEEE 802.15.4 ZIGBEE para comunicaciones inalámbricas de área personal de bajo consumo de energía y su comparación en el

- estándar IEEE 802.15.1 BLUETOOTH», bachelorThesis, QUITO/ EPN/ 2006, 2006.
Accedido: 28 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en:
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/55>
- [36] R. Martínez Jacobso, «Comparativa y estudio de plataformas IoT», B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- [37] kgreman, «Conceptos de IoT y Azure IoT Hub», 24 de marzo de 2023.
<https://learn.microsoft.com/es-es/azure/iot-hub/iot-concepts-and-iot-hub> (accedido 31 de marzo de 2023).
- [38] «Soluciones IoT | IBM». <https://www.ibm.com/mx-es/cloud/internet-of-things> (accedido 2 de abril de 2023).
- [39] «macchina.io - IoT Edge Device Software Development and Secure Remote Access Solutions», *macchina.io*. <https://macchina.io> (accedido 5 de abril de 2023).
- [40] «IoT Analytics - ThingSpeak Internet of Things». <https://thingspeak.com/> (accedido 6 de abril de 2023).
- [41] R. Loureiro Garrido, «Estudio plataformas IoT», 2015.
- [42] comonline, «Conoce “Thinking Things”, el primer producto comercial de Internet de las Cosas de Telefónica es #Green», *Telefónica*, 24 de octubre de 2014.
<https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/blog/conoce-thinking-things-el-primer-producto-comercial-de-internet-de-las-cosas-de-telefonica-es-green/> (accedido 6 de abril de 2023).
- [43] J. de Andalucía, «Estado del arte de las TIC aplicada a la edificación inteligente», *Cons. Econ. Innov. Cienc.*, 2011.
- [44] M. F. Marín, G. C. Medina, y J. M. Grijlava, «Implementación de Sistema Inmótico: Estudio de Protocolos de Comunicación», *INVESTIGATIO*, n.º 8, pp. 71-84, 2016.
- [45] R. R. Rodríguez, R. M. A. Pérez, O. C. Aburto, L. G. V. Valdes, S. A. A. Díaz, y C. G. Meneses, «BUSES Y PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN PARA INSTALACIONES DOMÓTICAS», *DYNA*, vol. 89, n.º 4, pp. 387-392, jul. 2014, doi: 10.6036/7009.
- [46] A. Semle, «Protocolos IIoT para considerar», *Aadeca Rev.*, vol. 34, 2016.
- [47] D. Glaroudis, A. Iossifides, y P. Chatzimisios, «Survey, comparison and research challenges of IoT application protocols for smart farming», *Comput. Netw.*, vol. 168, p. 107037, 2020.
- [48] «IoT And MongoDB’s Developer Data Platform», *MongoDB*.
<https://www.mongodb.com/use-cases/internet-of-things> (accedido 23 de febrero de 2023).
- [49] M. Lederkremer, *Redes informáticas*. RedUsers, 2019.
- [50] M. A. Mejía *et al.*, «Protocolos y topologías utilizadas en los sistemas de comunicación de las microrredes eléctricas», *Cienc. Ing. Apl.*, vol. 4, n.º 1, pp. 81-95, 2021.
- [51] H. M. Hussain, N. Javaid, S. Iqbal, Q. U. Hasan, K. Aurangzeb, y M. Alhussein, «An Efficient Demand Side Management System with a New Optimized Home Energy Management Controller in Smart Grid», *Energies*, vol. 11, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2018, doi: 10.3390/en11010190.
- [52] O. A. Pineda Valdivieso, «Sistemas de gestión de energía para Smart Home basados en android», B.S. thesis, 2018.
- [53] «Placas de desarrollo | Sistemas Espressif».
<https://www.espressif.com/en/products/devkits/esp32-devkitc/overview> (accedido 22 de mayo de 2023).
- [54] «Adafruit Industries, Unique & fun DIY electronics and kits». <https://www.adafruit.com/> (accedido 22 de mayo de 2023).
- [55] «YHDC SCT-013-000 Current Transformer — OpenEnergyMonitor 0.0.1 documentation». <https://docs.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/yhdc-sct-013-000-ct-sensor-report.html> (accedido 30 de mayo de 2023).

- [56] «PM01 - Power module - AC - DC Module - HLK-2M05/2M03/2M09/2M12/2M24 HLK-PM01/PM03/PM09/PM12/PM24 3W AC-DC power module - Hi_Link - Shenzhen Hilink Electronics». <https://www.hlktech.com/en/Goods-12.html#datum> (accedido 30 de mayo de 2023).
- [57] «MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico». <https://la.mathworks.com/products/matlab.html> (accedido 16 de junio de 2023).
- [58] J. M. Chalco Corella, «Optimización multiobjetivo del consumo eléctrico basado en la respuesta a la demanda», bachelorThesis, 2017. Accedido: 7 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13539>
- [59] T. P. Pablo Juan, *Introducción a las señales y sistemas*. Universidad del Norte, 2016.
- [60] «TD III Pareto e Intervalos.pdf». Accedido: 17 de julio de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://jggomez.eu/K%20Informatica/3%20Excel/03%20Mis%20Temas/B%20BD%20y%20TD/TD%20III%20Pareto%20e%20Intervalos.pdf>
- [61] «La EEQ comparte consejos sobre uso eficiente de la electricidad - Publicador de contenidos». http://www.eeq.com.ec:8080/nosotros/comunicamos/noticias/-/asset_publisher/PDd0RO7ISu5d/content/la-eeq-comparte-consejos-sobre-uso-eficiente-de-la-electricidad/pop_up;jsessionid=BBDF9D4B513ABE50EC2B9D94F502F6D?_101_INSTANCIA_PDd0RO7ISu5d_viewMode=print (accedido 17 de agosto de 2023).
- [62] C. X. V. Ochoa, «CNEL EP expone tarifa residencial y tips de consumo eléctrico», *CNEL EP*, 13 de febrero de 2019. <https://www.cnelep.gob.ec/cnel-ep-expone-tarifa-residencial-y-tips-de-consumo-electrico/> (accedido 17 de agosto de 2023).