

**Desarrollo de un prototipo de telegestión IoT para los tomacorrientes en instalaciones  
eléctricas de Baja Tensión en Colombia**

Yiosef Alonso Villegas

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería - ECBTI

Ingeniería Electrónica

2022

**Desarrollo de un prototipo de telegestión IoT para los tomacorrientes en instalaciones eléctricas de Baja Tensión en Colombia**

Yiosef Alonso Villegas

Proyecto aplicado para optar por el título de Ingeniero Electrónico

Director

MSc. Freddy Alexander Torres Payoma

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería - ECBTI

Ingeniería Electrónica

2022

## **Dedicatoria**

A todos los seres que han muerto y vivido en nombre de la Ciencia y el Progreso Tecnológico.

“Lo bueno de la ciencia es que es cierta...independientemente de si crees o no en ella.”

Neil deGrasse Tyson

## Agradecimientos

Mi agradecimiento a mi señora madre Cielo por sudarsela por su hijo que hoy por hoy culmina una etapa mas de vida gracias a su apoyo. A mi novia Tatiana por su apoyo moral y compañía incondicional a través de estos años. Al profe Freddy, al profe Manuel y al profe Montoya quienes me han guiado en este mundo de la Investigación. A todos los docentes por su tan valiosa labor en educar a los futuros profesionales. A las personas que día a día, desde tiempos antiguos, han buscado mejorar la calidad de vida humana a través de la Ciencia, la Tecnología y la Investigación y quienes han sido inspiración para yo también elegir ese camino. A las compañeras y los compañeros de estudio y de trabajo, a las viejas amistades, a la comunidad académica y científica, a la Escuela de Lanceros, a todas las personas que se han atravesado en mi vida y a la Vida misma, ¡Gracias! Cada experiencia, cada vivencia, cada persona, se convierte en una variable que lleva al resultado que se obtiene hoy y que se obtendrá mañana. Que influyen para uno ser quien es, a vivir como se vive y a hacer lo que se hace. y por último, egoísta sí, pero me agradezco por haber tomado las decisiones que he tomado, por haber aprovechado las oportunidades cuando se presentaron y por esforzarme para llegar a uno de los muchos culmenes de la vida. Al final, uno es quien construye su camino de vida y decide cómo vivir. Agradecimiento especial a mis dos perros quienes se convirtieron en un baluarte para hacer mas ameno y alegre el diario vivir.

## Resumen

Siguiendo el Plan Energético Nacional 2020-2050, se presenta el siguiente proyecto cuyo objetivo es desarrollar un prototipo de un sistema de telegestión IoT para los tomacorrientes en las instalaciones eléctricas de Baja Tensión de Uso General (BT-UG) en Colombia. Encaminado con la adopción de nuevas tecnologías de uso, medición y análisis, el prototipo del sistema de telegestión IoT desarrollado plantea un antecedente y una evidencia científica y tecnológica que demuestra cómo los sistemas inteligentes de gestión energética y el IoT pueden aportar y ayudar en el cumplimiento de las políticas del Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE), en el aumento de la eficiencia energética y para el consumo responsable y sostenible de la energía eléctrica. Siguiendo la metodología del proceso tecnológico, se realiza una búsqueda de información la cual fundamenta los diferentes diseños realizados de la solución tecnológica. Posterior, se desarrolla y se monta un prototipo para su evaluación y validación experimental. Los resultados obtenidos del diseño, desarrollo, montaje, evaluación e implementación del prototipo del sistema de telegestión IoT evidencian la utilidad e impacto que puede tener este tipo de sistemas para la gestión energética del consumo de los aparatos eléctricos en las instalaciones BT-UG y en los diferentes sectores energéticos del país.

**Palabras clave:** Tomacorriente Inteligente, Internet de las Cosas, Telegestión, Consumo eléctrico, Gestión energética, Eficiencia energética.

## Abstract

Following the National Energy Plan 2020-2050, it's presented the following project which objective is to develop a prototype of an IoT telemanagement system for electrical plugs in Low Voltage General Use installations (BT-UG) in Colombia. Guided by the adoption of new technologies for use, measurement and analysis the electrical energy, the prototype of the IoT telemanagement system developed provides a background and scientific and technological evidence that demonstrates how smart energy management systems and IoT can contribute and help in compliance of the policies of the Rational and Efficient Use of Energy (URE), in the increase of energy efficiency and for the responsible and sustainable consumption of electrical energy. Following the methodology of the technological process, a search for information is carried out, which bases the different designs made of the technological solution. Subsequently, a prototype is developed and assembled for its evaluation and experimental validation. The results obtained from the design, development, assembly, evaluation and implementation of the prototype of the IoT telemanagement system show the usefulness and impact that this type of system can have for the energy management of the consumption of electrical appliances in BT-UG installations and in the different energy sectors of the country.

**Keywords:** Smart Plug, Internet of Things, Telemanagement, Electrical Energy Consumption, Energy Management, Energy Efficiency.

**Tabla de Contenido**

<b>Lista de Tablas</b>	<b>9</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>11</b>
<b>Siglas y Acrónimos</b>	<b>16</b>
<b>Introducción</b>	<b>17</b>
<b>Planteamiento del Problema</b>	<b>20</b>
<b>Justificación</b>	<b>22</b>
<b>Antecedentes</b>	<b>25</b>
<b>Objetivos</b>	<b>31</b>
<b>Metodología</b>	<b>32</b>
<b>Marco Conceptual</b>	<b>33</b>
<b>Etapas de Diseño</b>	<b>81</b>
<b>Etapas de Desarrollo</b>	<b>103</b>
<b>Montaje Físico</b>	<b>119</b>
<b>Etapas de Evaluación</b>	<b>123</b>
<b>Implementación</b>	<b>156</b>

<b>Resultados</b>	<b>158</b>
<b>Discusión y Conclusiones</b>	<b>210</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>215</b>
<b>Anexos</b>	<b>224</b>



## Lista de Tablas

1.	Uso de la Energía Eléctrica por Sector . . . . .	19
2.	Variables Eléctricas Básicas . . . . .	34
3.	Circuitos Serie y Paralelo . . . . .	38
4.	Modelamiento DC . . . . .	41
5.	Transductores . . . . .	53
6.	Cualidades de las Mediciones . . . . .	60
7.	Variables Estadísticas Descriptivas . . . . .	62
8.	Variables Estadísticas de la Distribución de Gauss . . . . .	66
9.	Modelo de Referencia del IoT . . . . .	70
10.	Elementos del Sistema de Telegestión IoT . . . . .	85
11.	Dispositivos Físicos de la Red de Comunicaciones IoT . . . . .	92
12.	Redes de Área de Comunicaciones . . . . .	94
13.	Pruebas para la Evaluación del Prototipo . . . . .	127
14.	Modelo Matemático Ideal de las Variables Eléctricas . . . . .	131
15.	Consumo Total Ideal por Cada Prueba . . . . .	133
16.	Valores de las Variables Adicionales . . . . .	143
17.	Rango de las Tolerancias . . . . .	154
18.	Aparatos Eléctricos para la Implementación . . . . .	156
19.	Mediciones de la Resistencia Total . . . . .	160
20.	Requerimientos del Tomacorriente Inteligente . . . . .	235
21.	Requerimientos del AP/Gateway de Perímetro . . . . .	236

22.	Requerimientos de la Estación de Trabajo . . . . .	236
23.	Requerimientos del Dispositivo Móvil . . . . .	237
24.	Requerimientos de Internet y los Servicios de Nube . . . . .	237
25.	Listado de Componentes del Prototipo . . . . .	238
26.	Modelo Matemático Ideal de las Variables Eléctricas . . . . .	244

## Lista de Figuras

1.	Intensidad Energética en Consumo Final . . . . .	17
2.	Uso de la Energía Eléctrica en Sectores Energéticos . . . . .	18
3.	Configuraciones Básicas de Circuitos . . . . .	36
4.	Señal DC . . . . .	40
5.	Señal AC . . . . .	42
6.	Señal AC Senoidal . . . . .	43
7.	Experimento de Faraday . . . . .	44
8.	Efecto Hall . . . . .	45
9.	Sensor de Efecto Hall . . . . .	46
10.	Sensor ACS712 . . . . .	47
11.	Inducción Electromagnética . . . . .	48
12.	Métodos de Inducción Electromagnética . . . . .	50
13.	Método Resistivo . . . . .	54
14.	Método por Efecto Hall . . . . .	55
15.	Método por Inducción Electromagnética . . . . .	56
16.	Etapas de Instrumentación y Control Electrónico . . . . .	59
17.	Ejemplo de la Estadística Descriptiva . . . . .	61
18.	Ejemplo de la Estadística Histórica . . . . .	64
19.	Ejemplo de la Distribución de Gauss . . . . .	65
20.	Factores de Conexión de los Objetos al IoT . . . . .	68
21.	Fundamentos del IoT . . . . .	69

	12
22. Arquitectura Base de Red para IoT . . . . .	71
23. Modelos de Referencia para las Redes de Comunicaciones . . . . .	72
24. Topologías Físicas de Red . . . . .	74
25. Marco Legal y Normativo . . . . .	80
26. Diagrama de Elementos . . . . .	84
27. Diagrama de Bloques Lógico . . . . .	86
28. Diagrama de la Red de Comunicaciones IoT . . . . .	88
29. Diagrama de Bloques Funcional del Tomacorriente Inteligente . . . . .	97
30. Diagrama de Bloques Funcional del Sistema de Telegestión IoT . . . . .	100
31. Requerimientos Generales para las GUI . . . . .	102
32. Esquemático del Tomacorriente Inteligente . . . . .	116
33. Esquemático del AP/Gateway de Perímetro . . . . .	117
34. Algoritmo General de Funcionamiento . . . . .	118
35. Montaje del Tomacorriente Inteligente y del AP/Gateway de Perímetro . . . . .	119
36. GUI de la Plataforma IoT . . . . .	120
37. GUI de la Aplicación Móvil . . . . .	121
38. Montaje del Prototipo del Sistema de Telegestión IoT . . . . .	122
39. Ruta de Evaluación . . . . .	123
40. Circuito Ideal de la Carga de prueba . . . . .	126
41. Simulación del Modelo Ideal para 1 Resistor . . . . .	131
42. Simulación del Modelo Ideal para 5 Resistores . . . . .	132
43. Simulación del Modelo Ideal para 10 Resistores . . . . .	133
44. Esquemático del Circuito de Prueba . . . . .	137

45.	Circuito Equivalente de Prueba . . . . .	141
46.	Circuito Equivalente de Prueba Desenergizado . . . . .	142
47.	Tolerancias Aproximadas para 1 Resistor . . . . .	148
48.	Simulación del Modelo Aproximado para 1 Resistor . . . . .	149
49.	Tolerancias Aproximadas para 5 Resistores . . . . .	150
50.	Simulación del Modelo Aproximado para 5 Resistores . . . . .	151
51.	Tolerancias Aproximadas para 10 Resistores . . . . .	152
52.	Simulación del Modelo Aproximado para 10 Resistores . . . . .	153
53.	Implementación del Prototipo . . . . .	157
54.	Estadística Descriptiva de la Tensión de la Red Eléctrica . . . . .	161
55.	Estadística Descriptiva de Tensión para 1 Resistor . . . . .	162
56.	Estadística Descriptiva de Corriente para 1 Resistor . . . . .	163
57.	Estadística Descriptiva de Potencia para 1 Resistor . . . . .	164
58.	Estadística Descriptiva de Tensión para 5 Resistores . . . . .	166
59.	Estadística Descriptiva de Corriente para 5 Resistores . . . . .	167
60.	Estadística Descriptiva de Potencia para 5 Resistores . . . . .	168
61.	Estadística Descriptiva de Tensión para 10 Resistores . . . . .	170
62.	Estadística Descriptiva de Corriente para 10 Resistores . . . . .	171
63.	Estadística Descriptiva de Potencia para 10 Resistores . . . . .	172
64.	Estadística Histórica para 1 Resistor . . . . .	174
65.	Estadística Histórica del Consumo Eléctrico para 1 Resistor . . . . .	175
66.	Estadística Histórica para 5 Resistores . . . . .	176
67.	Estadística Histórica del Consumo Eléctrico para 5 Resistores . . . . .	177

68.	Estadística Histórica para 10 Resistores . . . . .	178
69.	Estadística Histórica del Consumo Eléctrico para 10 Resistores . . . . .	178
70.	Distribución de Gauss de Tensión para 1 Resistor . . . . .	180
71.	Distribución de Gauss de Corriente para 1 Resistor . . . . .	181
72.	Distribución de Gauss de Potencia para 1 Resistor . . . . .	182
73.	Distribución de Gauss de Tensión para 5 Resistores . . . . .	183
74.	Distribución de Gauss de Corriente para 5 Resistores . . . . .	184
75.	Distribución de Gauss de Potencia para 5 Resistor . . . . .	185
76.	Distribución de Gauss de Tensión para 10 Resistores . . . . .	186
77.	Distribución de Gauss de Corriente para 10 resistores . . . . .	187
78.	Distribución de Gauss de Potencia para 10 Resistores . . . . .	188
79.	Estadística Comparativa del Tomacorriente Inteligente . . . . .	189
80.	Estadística Comparativa del Consumo Eléctrico del Tomacorriente Inteligente . . .	190
81.	Estadística Comparativa del ERP para 1 Resistor . . . . .	191
82.	Estadística Comparativa del ERP para 5 Resistores . . . . .	191
83.	Estadística Comparativa del ERP para 10 Resistores . . . . .	192
84.	Estadística Histórica de la Implementación . . . . .	200
85.	Estadística Histórica de los Datos No Nulos . . . . .	201
86.	Estadística Histórica de las Anomalías . . . . .	201
87.	Estadística Histórica de los Datos Validos . . . . .	202
88.	Estadística Histórica del Consumo Eléctrico . . . . .	203
89.	Estadística Histórica del Consumo Eléctrico Acumulado . . . . .	203
90.	Documento Técnico . . . . .	224

91.	Certificado Ponencia Expotech 2021 . . . . .	225
92.	Artículo . . . . .	225
93.	Foro Arduino . . . . .	226
94.	Pagina Web . . . . .	226
95.	Problemática Identificada para la Red de Comunicaciones . . . . .	232
96.	Escalamiento Propuesto para la Red de Comunicaciones IoT . . . . .	234
97.	Impresión 2D del Tomacorriente Inteligente . . . . .	240
98.	Impresión 2D del AP/Gateway de Perímetro . . . . .	240
99.	Archivo de Registro de los CSM . . . . .	241
100.	Archivo de Procesamiento de la Información . . . . .	242
101.	Archivo de Análisis de la Información . . . . .	243
102.	Temperatura del Resistor sin el Sistema de Refrigeración . . . . .	245
103.	Temperatura del Resistor con el Sistema de Refrigeración . . . . .	246
104.	Carga de Prueba . . . . .	247
105.	Circuito de Prueba . . . . .	248

## Siglas y Acrónimos

**AC:** *Alternating Current* - Corriente Alterna.

**AMI:** *Advanced Metering Infrastructure* - Infraestructura Avanzada de Medición.

**AP:** *Access Point* - Punto de Acceso de Red.

**BT-UG:** Baja Tensión de Uso General.

**DC:** *Direct Current* - Corriente Directa.

**GUI:** *Graphical User Interface* - Interfaz Gráfica de Usuario.

**HMI:** *Human-Machine Interaction* - Interacción Humano-Maquina.

**IoT:** *Internet of Things* - Internet de las Cosas.

**ISP:** *Internet Service Provider* - Prestador del Servicio de Internet.

**ODS:** Objetivo de Desarrollo Sostenible.

**PCB:** *Printed Circuit Board* - Tarjeta de Circuito Impreso.

**SEM:** *Smart Energy Meter* - Medidor Inteligente de Energía.

**SoC:** *System on Chip* - Sistema en un Circuito Integrado.

**TI:** Tomacorriente Inteligente.

**URE:** Uso Racional y Eficiente de la Energía

**WAP:** *Wireless Access Point* - Punto de Acceso Inalámbrico.

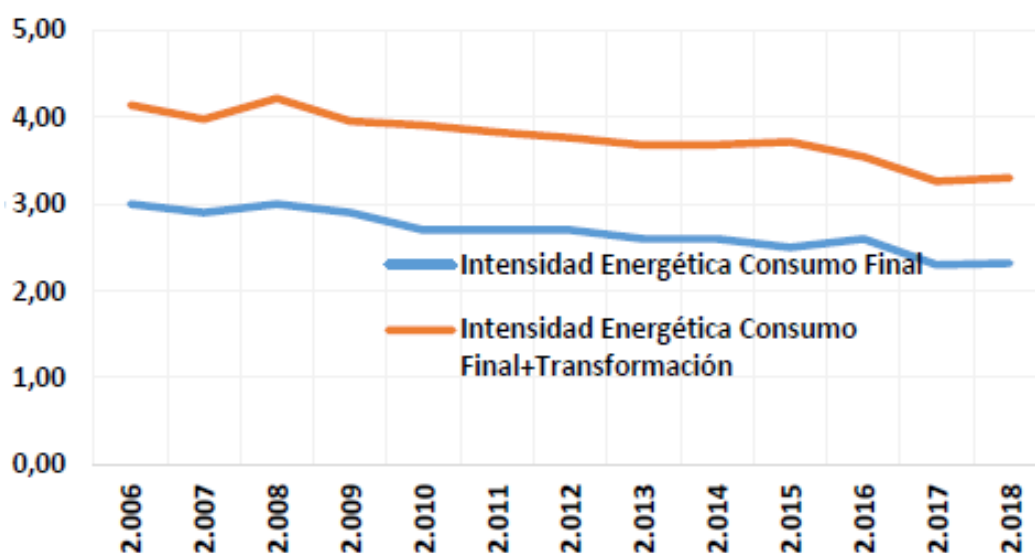


## Introducción

En el 2015, la Organización de Naciones Unidas (ONU) planteó los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), siendo los ODS-7 Energía Asequible y No Contaminante, ODS-9 Industria, Innovación e Infraestructura, ODS-12 Producción y Consumos Responsables y el ODS-13 Acción por el Clima relevantes para el sector energético (ONU, 2015). Dentro de los compromisos del país con respecto a los ODS está la reducción de la intensidad energética a través de políticas como los Programas de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PROURE) (UPME, 2019). En la Figura 1 se presenta la evolución del indicador y comportamiento frente a la intensidad energética esperada de 2.9 TJ/mil de millones de COP para el 2030.

### Figura 1

*Intensidad Energética en consumo final*



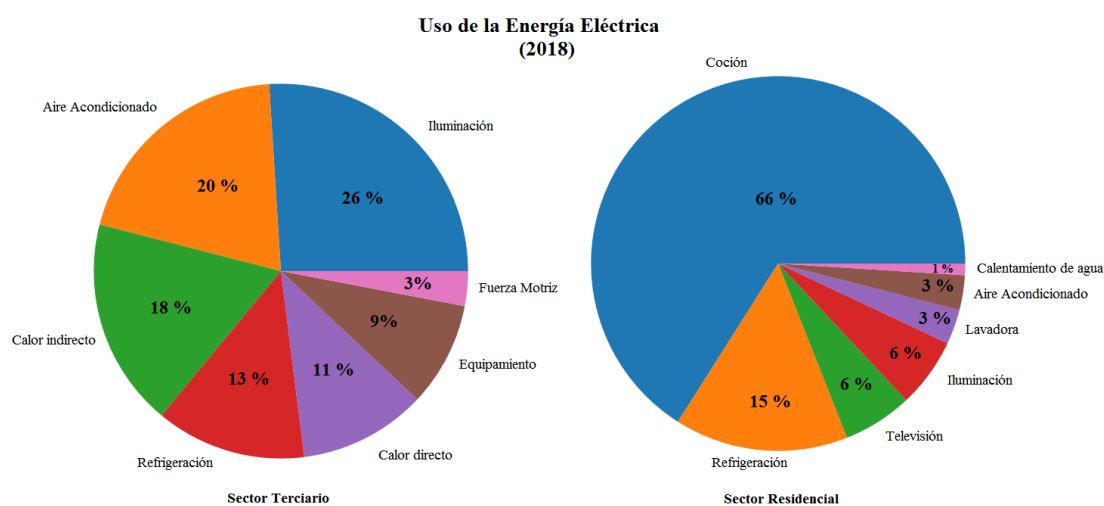
**Nota:** Se muestra la energía consumida anualmente en TJ por cada mil millones de COP - Base 2005. Nótese la disminución hacia la meta de 2.9 TJ/mil millones de COP.

Fuente: UPME (2019)

El Plan Energético Nacional (PEN) 2020-2050, presentado por UPME (2019), plantea seis objetivos generales para el sector energético del país. Este proyecto se fundamenta en la adopción de nuevas tecnologías de uso, medición y análisis orientadas a la eficiencia energética, comenzando por las redes eléctricas mediante la implementación de sistemas artificiales inteligentes.

Es importante conocer los diferentes sectores que componen al sector energético y su comportamiento respecto al uso de la energía eléctrica con el fin de generar soluciones óptimas para cada uno de ellos. En Colombia, el sector energético se divide en cuatro sectores: transporte, industrial, residencial y terciario (UPME, 2019). El uso de la energía eléctrica en cada uno de los sectores se muestra en la Tabla 1, en la cual se identifica que los sectores residencial (Fig. 2 der.) y terciario (Fig. 2 izq.) son los que más consumen energía eléctrica para sus actividades, por lo que la implementación de nuevas tecnologías y sistemas inteligentes se debe enfocar principalmente hacia estos dos sectores.

**Figura 2**  
*Uso de la Energía Eléctrica en Sectores Energéticos*



**Nota:** Uso de la energía eléctrica en las actividades de los sectores energéticos residencial (Der.) y terciario (Izq.) para el año 2018.

Fuente: Adaptado de UPME (2019).

**Tabla 1***Uso de la energía eléctrica por sector (año 2018)*

<b>Sector</b>	<b>% Uso de energía eléctrica</b>
Energético	31 %
Transporte	0 %
Industrial	19 %
Residencial	33 %
Terciario	72 %

**Nota:** Adaptado de UPME (2019)

## Planteamiento del Problema

A principios del siglo XXI se adoptó en Colombia la política del URE, a través de la Ley 697 de 2001 y el Decreto 3683 de 2003 actualizado al Decreto Único Reglamentario 1073 de 2015 (Alcaldía-de-Bogotá, 2021), cuya implementación evidencia un plan de mejora al óptimo uso de la energía, así como un aumento de la eficiencia energética (Nino-Vega y col., 2019) dando cumplimiento a los ODS de la ONU (UPME, 2019).

Con respecto a las acciones realizadas en torno al URE, se incluye el uso de aparatos eléctricos con mayor eficiencia energética, es decir, menor consumo eléctrico sin disminuir su eficiencia operacional. Entretanto, a nivel masivo se ha iniciado con la integración de redes eléctricas inteligentes a través de la Infraestructura Avanzada de Medición (AMI) (MinEnergía, 2022).

En un contexto global, la existencia de dispositivos para la gestión de la energía eléctrica, como los *Smart Energy Meters* (SEM) y los tableros, tomacorrientes e interruptores inteligentes, han optimizado y aumentado la eficiencia en la generación y distribución de la energía eléctrica por parte de las instituciones y empresas prestadoras del servicio de energía eléctrica (Arévalo-López, 2020; Téllez-Gutiérrez y col., 2018). En Colombia, aunque la implementación de la AMI y los SEM ya se encuentra en fases exploratorias y experimentales en las redes de distribución eléctrica (Bustos, 2021; MinEnergía, 2022), es necesario implementar sistemas y dispositivos inteligentes para la gestión del consumo eléctrico en las demás instalaciones eléctricas como las residenciales (García-Herrera, 2018) o del sector terciario como las empresariales (Ramírez-Madrid, 2018).

Por tanto, la investigación propone el desarrollo de un sistema basado en Internet de las Cosas (IoT) para la gestión remota (telegestión) del consumo eléctrico de los tomacorrientes de las instalaciones eléctricas de Baja Tensión de Uso General (BT-UG). El Ministerio de Minas y Energía de Colombia define este tipo de instalaciones como aquellas conectadas a las redes eléctricas de 120, 208, 220 o 240 V, y que no son instalaciones especiales ni militares (MinEnergía, 2013).

Al desarrollarse con los objetivos de medir, controlar, registrar y analizar el consumo eléctrico de los aparatos, equipos y cargas eléctricas, los sistemas y dispositivos inteligentes de gestión del consumo eléctrico le brindan al usuario una información detallada de su comportamiento de consumo eléctrico (Arévalo-López, 2020) por lo que resulta importante para el cumplimiento de las políticas del URE y de la eficiencia energética el desarrollo del sistema de telegestión IoT para los tomacorrientes de las instalaciones BT-UG.

### **Pregunta de Investigación**

¿Cómo es posible desarrollar un sistema inteligente de telegestión para aumentar el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) de los tomacorrientes de 120 a 240 V 15/20 A en las instalaciones eléctricas de BT-UG de Colombia?

## Justificación

En el compilado normativo, presentado en Alcaldía-de-Bogotá (2021), se presenta la normatividad, la regulación y las políticas públicas orientadas al URE y al consumo responsable y sostenible de la energía eléctrica en Colombia, realizándose principalmente a través de políticas y acciones de ahorro de energía eléctrica y del uso de aparatos, equipos y dispositivos eléctricos con mayor eficiencia energética. Dentro de la normatividad, se destaca el Decreto Único Reglamentario 1073 de 2015, especialmente los Art. 2.2.3.6.2.1 y Art. 2.2.3.6.2.2 que reglamentan las políticas de URE, y la Ley 1955 de 2019 la cual dictaminó en el Art. 292 la obligación del ahorro de energía en instituciones públicas. Adicionalmente, como se mencionó en la Introducción, el PEN 2020-2050 establece el objetivo de adoptar nuevas tecnologías de uso, medición y análisis para el consumo energético y la recomendación de transitar hacia las Redes Energéticas Inteligentes.

A partir de las normativas y políticas públicas relacionadas con el URE, el Ministerio de Minas y Energía comenzó los estudios exploratorios y las pruebas experimentales de la AMI esperando a futuro “una mejor calidad del servicio; control, optimización y planeación de la red; reducir emisiones de carbono; fomentar la generación distribuida, las tarifas horarias y la eficiencia en los consumo; reducir los costos de comercialización y pérdidas de energía; y empoderar a los usuarios finales” (MinEnergía, 2022). La AMI evidencia la importancia e impacto que tienen los sistemas inteligentes de gestión para cumplir con las políticas relacionadas con el URE y los ODS relacionados con el sector eléctrico.

Las instalaciones de BT-UG deben cumplir con las exigencias de las políticas públicas del URE, lo cual justifica la necesidad de que el usuario final cuente con las respectivas herramientas

para conocer específicamente el comportamiento de su consumo eléctrico. No obstante, en Arévalo-López (2020), se justifica que, en la actualidad, los recibos del servicio de energía eléctrica y los medidores eléctricos convencionales presentan únicamente el consumo eléctrico total de una instalación sin dar a conocer el consumo específico de cada aparato, circuito ramal o carga eléctrica afectando la obtención de datos e información precisa para realizar las medidas correctivas requeridas en los aparatos o circuitos ramales que presentan un exceso de consumo o uso ineficiente de la energía eléctrica. Para resolver parte de esta situación, los SEM de la AMI, remplazarán paulatinamente los medidores eléctricos convencionales (MinEnergía, 2022).

A partir de lo anterior, se planteó una propuesta de investigación desde el proyecto de investigación de World Pendulum Alliance, cofinanciado por Erasmus+ de la Unión Europea, en la cual la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) participa con investigadores y estudiantes del semillero MathPhysics. Uno de los objetivos del proyecto fue la ampliación de la Red Experimental de Laboratorios Remotos a través de la creación del Centro de Diseminación de Ciencia (SDC) llamado *Science Dissemination Center on Remote Experimentation* (SDC - ReEx), siendo relevantes y pertinentes para esta propuesta los resultados obtenidos del ejercicio académico e investigativo realizado, desde el ReEx-SDC, en el cual se planteó un Experimento Remoto en torno al objeto de estudio del proyecto para obtener datos en tiempos real del consumo de los aparatos eléctricos (Alonso-Villegas, 2021).

Siguiendo el objetivo de Investigación y Desarrollo de la Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería (ECBTI) de la UNAD (UNAD, 2022), este proyecto se encamina al desarrollo de un sistema de Telegestión IoT que ofrezca una base científica y tecnológica, una evidencia experimental y un antecedente para desarrollarse a futuro un producto comercial que dé solución a las problemáticas identificadas para los usuarios de las instalaciones eléctricas de

BT-UG, lo anterior con el fin de que puedan contar con una herramienta tecnológica eficiente y precisa para la gestión del consumo de los aparatos eléctricos que se conectan a los tomacorrientes en miras del cumplimiento de las políticas del URE, el aumento de la eficiencia energética y la reducción de la intensidad energética.



## **Antecedentes**

A continuación, se presentan los estudios y antecedentes que resultan relevantes para el proyecto en la comprensión del estado del arte del desarrollo de SEM y TI, y del uso de sensores, actuadores y módulos de comunicaciones inalámbricas utilizados en sistemas de telegestión del consumo eléctrico.

### **Contexto Global**

Se pueden identificar diferentes iniciativas de investigación y desarrollo tecnológico que se han realizado alrededor del mundo donde se destacan las siguientes:

Rashid y Handhal (2017), en búsqueda de una alternativa para remplazar los medidores eléctricos mecánicos, presentan un modelo SEM para redes trifásicas basado en los módulos de sensores ACS-712 y ZMPT101B, y el cual se controla desde una tarjeta Arduino Mega. Adicional cuenta con un modulo transceptor NRF24L01 para el envío de información de forma inalámbrica para su visualización remota y una pantalla TFT para la visualización local.

Akbar y col. (2019) desarrollaron un modelo de TI basado en el módulos PZEM-004T y el cual se controla desde una tarjeta ESP8266 que habilita la gestión remota desde una aplicación móvil.

Ibáñez-Gudiño (2019) crearon un SEM basado en un sensor SCT-013 y un divisor resistivo de voltaje aislado mediante un transformador, ambos con su respectivo acondicionamiento para ser conectados a una tarjeta de desarrollo (NodeMCU, ESP, Arduino). La información se visualiza en una base de datos a través de la Web después de cargar los datos del registrador de datos del SEM.

Abed y Naser (2020) desarrollaron un SEM basado en el módulo PZEM-004T y el cual se controla a través de una tarjeta ESP-32 que habilita el envío de la información de forma inalámbrica hacia una base de datos SQL.

Maghfiroh y col. (2021) desarrollaron un inversor de voltaje el cual se gestiona desde una tarjeta Arduino Uno. El sistema de medición del inversor esta basado en un divisor de voltaje resistivo y un sensor INA219 para la medición de potencia DC y un modulo PZEM-004T para la medición de potencia AC. La información se visualiza de forma local a través de una pantalla OLED.

Tobi y Van Harling (2021) crearon un sistema de transmisión inalámbrica de energía eléctrica al cual le implementaron un sistema de medición inalámbrico basado en el modulo PZEM-004T y el cual se controla desde una tarjeta Arduino Uno. El sistema de medición cuenta con un modulo transeptor NRF24L01 que envía la información a un receptor que procesa la información y la visualiza de forma local en una pantalla LCD.

Kadala y col. (2021) implementaron un sistema IoT para la distribución inteligente de la energía eléctrica. Este sistema esta basado en el módulo PZEM-004T, el módulo sensor ACS-712 y un módulo de relés. Es controlado mediante una tarjeta Arduino UNO y realiza el envío de información de forma inalámbrica mediante SMS a través de un modulo GSM SIM900A lo que habilita la gestión remota del sistema de distribución de la energía eléctrica.

### **Contexto Latinoamericano**

En varios países de la región latinoamericana, como Argentina, Ecuador, México y Perú, se han realizado iniciativas de desarrollo tecnológico para ofrecer sistemas o dispositivos para la medición del consumo eléctrico de forma remota, principalmente en instalaciones residenciales:

Poma-Aliaga (2017) desarrolló en Perú, un sistema inteligente basado en el sensor ACS712, un divisor resistivo de voltaje con una etapa ADC, un sensor de presencia PIR y un actuador de conmutación tipo TRIAC. El sistema se gestiona desde un microcontrolador ATMEGA88 y cuenta con funciones de *Machine Learning* y Redes Neuronales Artificiales para establecer el sistema inteligente de ahorro de energía.

Moreno-Quizhpe (2018) desarrolló en Ecuador un prototipo basado en el modulo sensor ACS-712 y un modulo relé, y el cual se controla desde una tarjeta ESP-8266 que habilita la gestión del sistema de forma inalámbrica, para la medición y control del consumo eléctrico de dispositivos domésticos con visualización remota a través de una GUI almacenada en un servidor web.

Flores-Figueroa y col. (2018) diseñaron en México un modelo SEM basado en un módulo sensor ACS758 y un divisor de voltaje resistivo aislado mediante un transformador y amplificado a través de un AD623, ambos sensores acondicionados mediante un ADC MCP3008. El ADC se conecta a una Raspberry Pi el cual se encarga de procesar la información para visualizarla de forma local en una pantalla LCD y de forma remota en una aplicación Móvil

Romero-Gaibor y col. (2018) crearon un Medidor Inteligente de Energía Eléctrica Residencial (MIEER) para la detección del hurto de energía eléctrica, el cual esta basado en un modulo PZEM-004T, un IC SD3004 y un modulo de relés. El MIEER se controla a través de una tarjeta Arduino Mega y se visualiza la información de forma local a través de una pantalla LCD y de forma remota en una GUI almacenada en un servidor web.

Palavecino y col. (2018) construyeron en Argentina un adaptador inteligente para dispositivos domésticos, llamado FLUXUS, el cual está basado en un medidor resistivo Shunt y un divisor de voltaje resistivo, ambos acondicionados a través del ADE9153E, y un modulo relé.

El dispositivo FLUXUS se controla mediante una Raspberry Pi que habilita la gestión de forma inalámbrica para la visualización remota de la información en una GUI almacenada en un servidor web.

Rodriguez-Litardo y Luna-Cruz (2019) desarrollaron en Ecuador un sistema de monitoreo y control del consumo eléctrico para instalaciones residenciales basado en un sensor SCT-013 y un módulo de relés, y el cual se controla mediante una tarjeta ESP8622 que habilita la gestión de forma inalámbrica para la visualización remota de la información en una GUI de una plataforma IoT y en una aplicación móvil.

Herrera-Heredia y Chávez-Enríquez (2020) implementaron en Ecuador un modelo SEM IoT, enfocado al ámbito residencial, basado en el sensor SCT-013 y un divisor de voltaje resistivo aislado mediante un transformador, ambos acondicionados para conectarse a una Raspberry Pi que procesa la información para el registro del consumo eléctrico en una base de datos y para la visualización en una GUI almacenada en un servidor web.

### **Contexto Colombiano**

Aunque en el país en los últimos 5 años se han realizado contadas investigaciones en el campo de los SEM o TI, existen algunos proyectos enfocados a mejorar la gestión y eficiencia energética a través de sistemas y dispositivos inteligentes:

En UPME (2016) se muestra la visión para el 2030 que se tiene para la implementación de Redes Eléctricas Inteligentes en Colombia.

Rodríguez-Moreno y López-Ordoñez (2017) desarrollaron un sistema de *Smart Building* implementado el IoT y el protocolo de comunicación LoRaWAN(R) que permite evidenciar los impactos positivos y ventajas que ofrecen los sistemas inteligentes y el IoT para la gestión

energética.

Los estudios de García-Herrera (2018) y Ramírez-Madrid (2018) identifican las necesidades existentes relacionadas con la gestión eficiente de la energía eléctrica en instalaciones residenciales y empresariales en Colombia.

Arévalo-López (2020) desarrolló un modelo SEM basado en el sensor ACS770, un divisor de voltaje resistivo y una etapa ADC. Adicional, cuenta con un modulo ESP8266 para la transmisión de la información de forma inalámbrica, y se gestiona desde un microcontrolador PIC18F14K22. El modelo SEM está enfocado hacia la medición y el registro del consumo eléctrico en instalaciones residenciales para reconocer los hábitos de consumo en los hogares.

Emprendimientos como el de NEU (2022) para la implementación de SEM, en remplazo de los medidores eléctricos convencionales en el país.

El inicio de implementación de los SEM de la AMI en Colombia que evidencia las ventajas de los sistemas inteligentes para la gestión del consumo eléctrico (MinEnergía, 2022).

### **Contexto Comercial**

Es importante conocer los productos que se encuentran en el mercado para analizar y comprender el estado actual de los sistemas y dispositivos inteligentes para la gestión del consumo eléctrico. Los siguientes productos comerciales tienen una alta relevancia para el proyecto:

OpenEnergyMonitor (2022) es una iniciativa *Open Source* y comercial, con base en Snowdonia (Nuevo Gales del Norte, UK), cuyo objetivo es ayudar a las personas en lo relacionado con el uso sostenible de la energía. Se destaca el modelo SEM emonPI.

SonOff (2022) es una empresa que ofrece un amplio catalogo de dispositivos para domótica e inmótica, incluyendo TI e interruptores inteligentes, donde se destaca el modelo IW101 que cuenta con funciones de medición y registro del consumo eléctrico y control ON/OFF de los aparatos eléctricos, y se puede gestionar desde diferentes asistentes virtuales móviles compatibles con SonOff.

Steren (2022) es una empresa mexicana comercializadora de productos electrónicos, la cual tiene presencia en diferentes países de Latinoamérica incluyendo Colombia. Actualmente ofrecen un modelo de TI con funciones de medición y registro del consumo eléctrico, y de control ON/OFF de los aparatos eléctricos, todo gestionado desde su propia aplicación móvil.

VTA (2019) es una empresa colombiana que ofrece productos para domótica e inmótica. Dentro de su catalogo ofrecen diferentes modelos de TI y multitomas inteligentes, aunque enfocados exclusivamente para el control ON/OFF de los aparatos eléctricos, ofreciendo únicamente el modelo VTA-84630 que cuenta con funciones tanto de medición y registro del consumo eléctrico, como de control ON/OFF, todo gestionado desde su propia aplicación móvil.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Desarrollar un prototipo de un sistema de telegestión IoT para los tomacorrientes de 120 a 240 V, 15/20 A en las instalaciones eléctricas de Baja Tensión de Uso General (BT-UG) en Colombia.

### **Objetivos Específicos**

Diseñar el prototipo de Tomacorriente Inteligente para la telemetría del consumo eléctrico y el telecontrol de los aparatos eléctricos que se conecten al sistema de telegestión.

Implementar la topología y la arquitectura de red para las comunicaciones entre los diferentes elementos y componentes del sistema de telegestión.

Desarrollar un análisis estadístico entre las variables físicas teóricas y simuladas, y los resultados experimentales obtenidos del prototipo desarrollado para su validación.

## Metodología

La metodología de trabajo está basada en el proceso tecnológico resumido por VIU (2015), la investigación será de carácter cuantitativo con base a Urbano y Yuni (2006) y el proyecto tendrá un enfoque aplicado con base a Espinoza-Montes (2010). Las etapas del proyecto son:

1. **Identificación del Problema:** Se introduce, plantea y justifica la problemática identificada: el cumplimiento de las políticas del URE, la eficiencia energética y la gestión del consumo eléctrico en los tomacorrientes de las instalaciones BT-UG.
2. **Búsqueda de Información:** Se realiza un estado del arte para identificar qué se ha hecho entorno al problema de estudio, plantear posibles soluciones desde el enfoque del proyecto e identificar las necesidades requeridas para el desarrollo de la solución tecnológica.
3. **Etapas de Diseño:** Se realizan los diseños conceptual, de la red de comunicaciones IoT, funcionales, de las Interfaces Gráficas de Usuario (GUI), de los archivos de información y de los requerimientos técnicos.
4. **Etapas de Desarrollo:** Desarrollo y montaje del prototipo funcional y operativo del sistema de telegestión IoT para tomacorrientes de las instalaciones BT-UG.
5. **Etapas de Evaluación:** Validación experimental, con respecto a los modelos matemáticos, en un entorno controlado y en una aplicación real para determinar el comportamiento operacional del prototipo desarrollado.
6. **Divulgación de Resultados:** Divulgación de los resultados obtenidos para su difusión y conocimiento por parte de las diferentes comunidades relacionadas con las áreas de conocimiento del proyecto (Ver Anexo 1).



## Marco Conceptual

### Elementos y Variables Eléctricas.

Se define la Energía Potencial Eléctrica  $U_E$  como la capacidad de generar un movimiento o trabajo de las partículas cargadas eléctricamente (Alexander & Sadiku, 2006), es decir, la capacidad para generar una corriente eléctrica a partir de una diferencia de potencial (tensión) en un determinado periodo de tiempo en un circuito eléctrico. Para el modelamiento y la cuantificación del comportamiento físico de los componentes y circuitos eléctricos se parte de la abstracción de elementos fundamentales eléctricos (Fuente o Generador, Resistor, Inductor y Capacitor) y de las variables eléctricas expuestas en la Tabla 2 las cuales se derivan de las magnitudes fundamentales, principalmente de la intensidad de corriente eléctrica  $I$  (Escobar & Torres, 2015).

### Leyes Físicas de los Circuitos Eléctricos

Los elementos fundamentales eléctricos junto con las variables de la Tabla 2 se relacionan mediante diferentes leyes y principios físicos, siendo los principales para circuitos eléctricos los siguientes:

**Tabla 2**  
*Variables Eléctricas Básicas*

Variable	Descripción	Unidad de medida (S.I)
Intensidad de corriente eléctrica ( $I$ )	Flujo de cargas eléctricas a través de un material o componente en un determinado periodo de tiempo	Amperio (A)
Tensión eléctrica ( $V$ )	Trabajo por unidad de carga requerido para mover una carga eléctrica entre dos puntos de diferente potencial eléctrico.	Voltio (V)
Resistencia eléctrica ( $R$ )	Propiedad que cuantifica la oposición al flujo de corriente eléctrica a través de un material o componente.	Ohmio ( $\Omega$ )
Potencia eléctrica ( $P$ )	Energía eléctrica generada o consumida en un determinado periodo de tiempo.	Vatio (W)
Consumo eléctrico ( $U_E$ )	Cantidad de energía eléctrica usada. Cantidad de potencia eléctrica consumida en un determinado tiempo.	Julio (J)

**Nota:** Variables eléctricas básicas de los circuitos eléctricos

### ***Ley de Ohm***

“La ley de Ohm establece que la tensión  $V$  a lo largo de un resistor es directamente proporcional a la corriente  $I$  que fluye a través del resistor.” (Alexander & Sadiku, 2006)

$$V \propto I$$

La ley de Ohm define la resistencia  $R$  como la constante de proporcionalidad entre la tensión aplicada  $V$  y la corriente  $I$  que atraviesa a un elemento resistor.

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

No obstante, es importante aclarar que la resistencia es una propiedad material que no depende de las variables eléctricas sino de la resistividad del material  $\rho$ , y la longitud  $\ell$  y sección transversal  $S$  del resistor (Eq. 2) por lo que en un circuito eléctrico las variaciones se producirán en la tensión  $V$  y/o en la corriente  $I$  para asegurar que  $R$  siempre sea idealmente constante (Alexander & Sadiku, 2006).

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{S} \quad (2)$$

### ***Nodos, Ramas y Lazos***

Un circuito eléctrico es la unión de diferentes componentes eléctricos a través de ramas, nodos, y lazos, los cuales se definen según Alexander y Sadiku (2006):

- Una rama  $b$  representa un solo elemento.
- Un nodo  $n$  es el punto de conexión entre dos o más ramas.
- Un lazo  $l$  es cualquier trayectoria cerrada en un circuito.

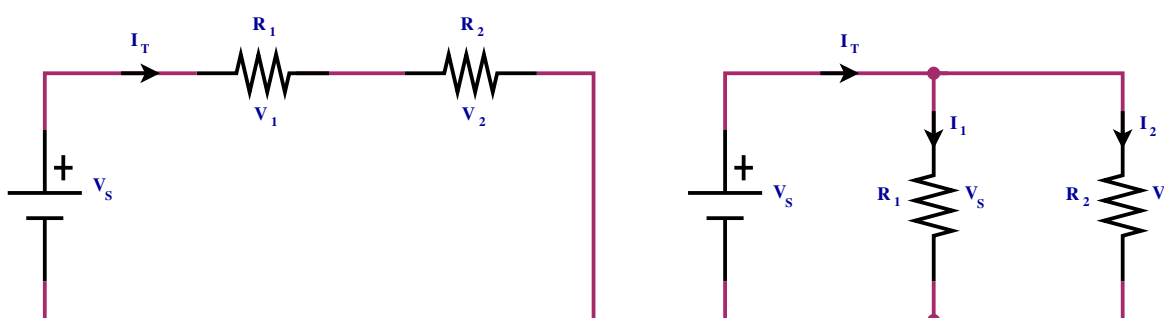
Los anteriores conceptos se relacionan mediante el teorema fundamental de la topología de redes:

$$b = l + n - 1$$

Si dos o más elementos comparte exclusivamente un solo nodo, conforman un circuito en serie y son atravesados por la misma intensidad de corriente  $I_T$  (Fig. 3. izq.). Entre tanto, si dos o más elementos están conectados al mismo nodo, conforman un circuito en paralelo y tienen la misma tensión  $V_S$  entre sus terminales (Fig. 3. der.) Las anteriores definiciones son fundamentales para el análisis de circuitos.

### Figura 3

*Configuraciones básicas de circuitos*



**Nota:** Izq) circuito en serie, misma intensidad de corriente para todos los resistores. Der) circuito en paralelo. misma tensión para todos los resistores.

### *Leyes de Kirchhoff*

Partiendo del principio de la Conservación de la carga (el resultado de la suma algebraica de las cargas dentro de un sistema cerrado es invariante) se define la Ley de Corrientes de Kirchhoff (LCK), la cual establece que, tomando como positivas las corrientes que entran a un nodo y negativas a las salientes, “la suma algebraica de las corrientes que entran a un nodo (o frontera cerrada) es de cero” (Eq. 3) lo cual es lo mismo que “la suma de las corrientes que entran a un nodo es igual a la suma de las corrientes que salen de él.” (Alexander & Sadiku, 2006) (Eq. 4)

$$\sum_{n=1}^N I_n = 0 \quad (3)$$

$$I_{in} = I_{out} \quad (4)$$

Partiendo del principio de la Conservación de la energía (la energía total en un sistema cerrado aislado es invariante) se define la Ley de Tensiones de Kirchhoff (LTK) la cual establece que, tomando un punto de conexión del elemento como el de mayor potencial eléctrico y el otro punto como el de menor, “la suma algebraica de todas las tensiones alrededor de una trayectoria cerrada (o lazo) es cero” (Eq. 5) (Alexander & Sadiku, 2006).

$$\sum_{n=1}^N V_n = 0 \quad (5)$$

### ***Serie y Paralelo***

Dos efectos del teorema fundamental de la topología de redes y las leyes de Kirchhoff son que en un circuito en serie las resistencias eléctricas  $R_n$  de cada elemento del circuito se suman para obtener la resistencia total del circuito  $R_T$ , la intensidad de corriente de cada elemento  $I_n$  es igual a la intensidad de corriente total del circuito  $I_T$ , y la tensión de cada elemento  $V_n$  varía según su  $R_n$  por lo que la tensión total  $V_T$  es igual a la sumatoria de las  $V_n$ .

Contrariamente, en los circuitos en paralelo,  $R_T$  es el inverso de la sumatoria de los inversos de cada  $R_n$ ,  $I_n$  varía según la  $R_n$  de cada elemento por lo que  $I_T$  es igual a la sumatoria de las  $I_n$ , y  $V_n$  en cada elemento es igual a la tensión total del circuito  $V_T$ . Matemáticamente, se define las anteriores relaciones como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3***Circuitos serie y paralelo*

Variable	Serie	Paralelo
Resistencia Total ( $R_T$ )	$\sum_{n=1}^N R_n$	$\frac{1}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{R_n}}$
Corriente Total ( $I_T$ )	$I_n$	$\sum_{n=1}^N I_n$
Tensión Total ( $V_T$ )	$\sum_{n=1}^N V_n$	$V_n$

**Nota:** Cálculo de las variables eléctricas básicas de los circuitos eléctricos

### *Ley de Watt*

La potencia  $P$  de un elemento eléctrico se calcula a partir de la ley de Watt, que relaciona la ley de Ohm con la potencia eléctrica:

$$P = V \cdot I \quad (6)$$

Adicional, si  $P$  es positiva significa que, un elemento es pasivo y absorbe (o utiliza) potencia del circuito. Inversamente, si  $P$  es negativa, el elemento es activo y entrega potencia al circuito. Así, los elementos resistores, capacitores e inductores son elementos pasivos, y las fuentes y generadores, tanto independientes como controlados, son elemento activos (Soria y col., 2004).

Empero, prácticamente, todo componente eléctrico, incluyendo las fuentes y los generadores reales, pueden modelarse como un resistor equivalente (Chen, 2004) por lo que la Ecuación 6 se puede redefinir como

$$P = I^2 \cdot R = \frac{V^2}{R} \quad (7)$$

La Ecuación 7 muestra que la potencia disipada por un elemento resistor es una función exponencial de la corriente o de la tensión, pero una función lineal de la resistencia eléctrica. A partir de lo anterior, se calcula la energía disipada en forma de calor  $Q$  en un periodo de tiempo  $t$  por un resistor en lo que se conoce como Efecto Joule (Eq. 8):

$$Q(t) = P \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t \quad (8)$$

configurando este efecto uno de los principios fundamentales para el funcionamiento de diversos aparatos eléctricos, el cual, si no es controlado de forma adecuada puede ocasionar una incidencia negativa en el comportamiento de los aparatos y sus componentes (Soria y col., 2004).

### **Señales de Corriente Eléctrica**

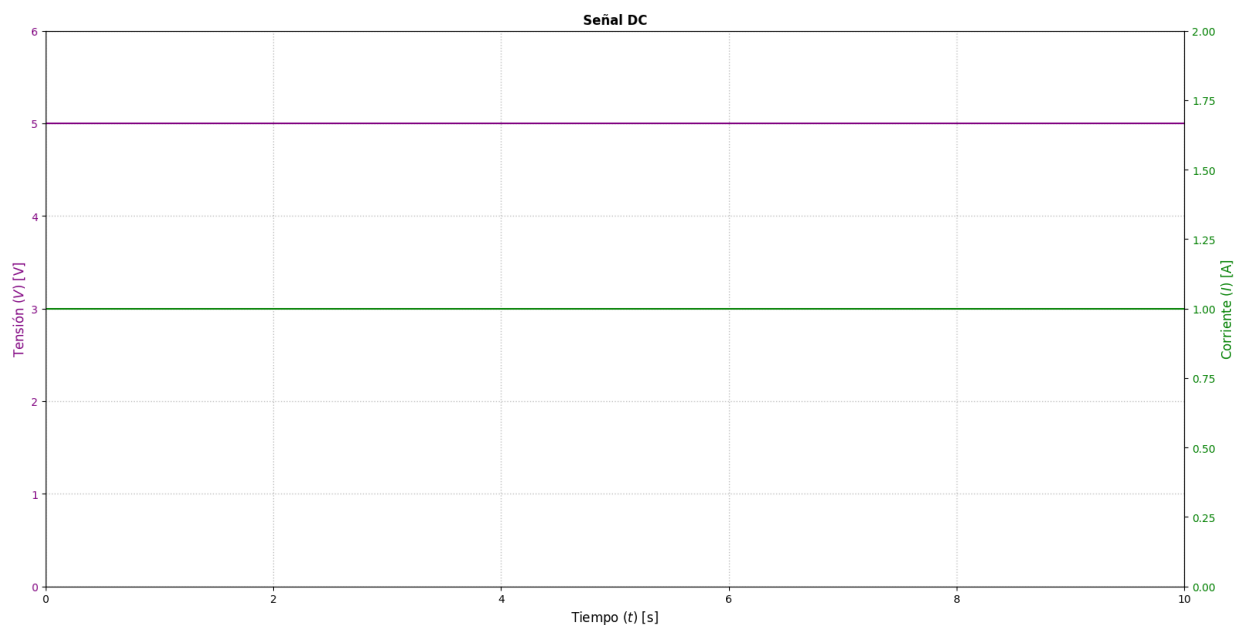
Las señales eléctricas pueden ser de un valor de corriente y tensión constante (Corriente Continua - DC) o variable, en las cuales la corriente y la tensión varían su magnitud y dirección de flujo en el tiempo (Corriente Alterna - AC).

## Corriente Continua - DC

Si la intensidad de corriente  $I$  y la tensión  $V$  mantienen constante su valor en un periodo determinado de tiempo  $T$ , se considera la señal eléctrica como señal DC (Fig. 4).

En régimen permanente DC el inductor y el capacitor se comportan como un cortocircuito (Tensión nula, Intensidad de corriente infinita) y un circuito abierto (Tensión infinita, Intensidad de corriente nula) respectivamente, al no existir variación en el tiempo de  $I$  y  $V$ . Sin embargo, prácticamente, ambos elementos tienen asociada una resistencia eléctrica por lo que en régimen permanente se modelan igual que un resistor. En régimen transitorio y en AC, el comportamiento de los tres elementos es diferente (Alexander & Sadiku, 2006; Chen, 2004).

**Figura 4**  
Señal DC



**Nota:** Ejemplo de una señal DC en la cual la tensión y la corriente permanecen de valor constante en el tiempo. Esta señal es típica de los dispositivos electrónicos



**Tabla 4***Modelamiento DC de las variables eléctricas básicas*

Variable	Resistor	Inductor	Capacitor
Corriente ( $I$ )	$\frac{V}{R}$	$\frac{1}{L} \cdot \int V dt$	$C \cdot \frac{dV(t)}{dt}$
Tensión ( $V$ )	$I \cdot R$	$L \cdot \frac{dI(t)}{dt}$	$\frac{1}{C} \cdot \int Idt$
Potencia ( $P$ )	$\frac{V^2}{R}, I^2 \cdot R$	$V(t) \cdot I(t)$	$V(t) \cdot I(t)$
Consumo ( $U_E$ )	$P \cdot T$	$\int P dt$	$\int P dt$

**Nota:** El modelamiento DC se puede aplicar tanto a señales DC como AC

En este tipo de señales, las variables de la Tabla 2 se calculan a partir de las leyes y principios físicos mencionados anteriormente como se muestra en la Tabla 4.

### **Corriente Alterna - AC**

Si la intensidad de corriente  $I$  y la tensión  $V$  varían su valor en un periodo determinado de tiempo  $T$ , se considera la señal eléctrica como señal AC. Un ejemplo de este tipo de señales es la mostrada en la Figura 5

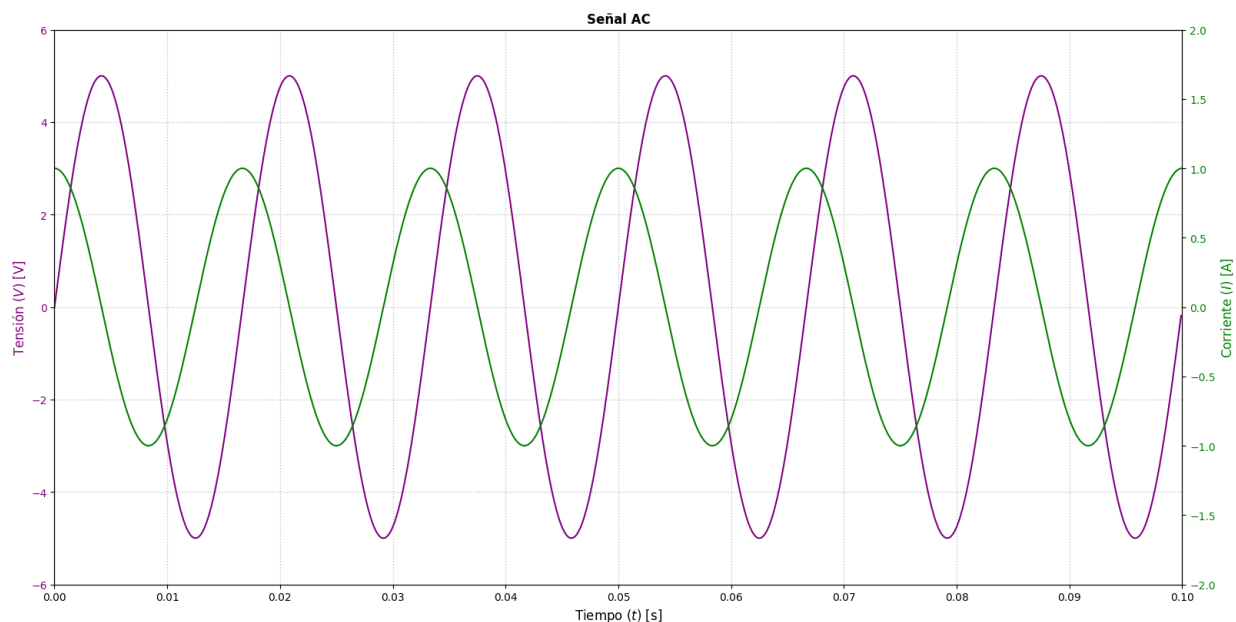
Las señales AC se clasifican de diferentes formas según sus características (Ambardar, 2002), siendo las principales clasificaciones según su:

- **Periodo:** Las señales periódicas son en las cuales se puede establecer su periodo  $T$  y frecuencia  $f$  de variación y se modelan matemáticamente según la forma u onda de la señal. Contrario, las señales aperiódicas, son señales sin un periodo definido de variación.
- **Amplitud:** Las señales de amplitud constante son en las cuales la variación de la magnitud se produce dentro de un rango fijo de valores, existiendo un valor limite o pico  $A$ . Por el

contrario, las señales de amplitud variable son señales sin un rango limitado de valores o que pueden variar entre diferentes rangos de valores, por lo que se puede o no establecer diferentes o ningún valor pico.

- **Valores:** Las señales analógicas son las cuales pueden tomar valores infinitesimales o continuos. En cambio las señales discretas solamente pueden tomar valores fijos, por lo general de tipo entero.

**Figura 5**  
*Señal AC*



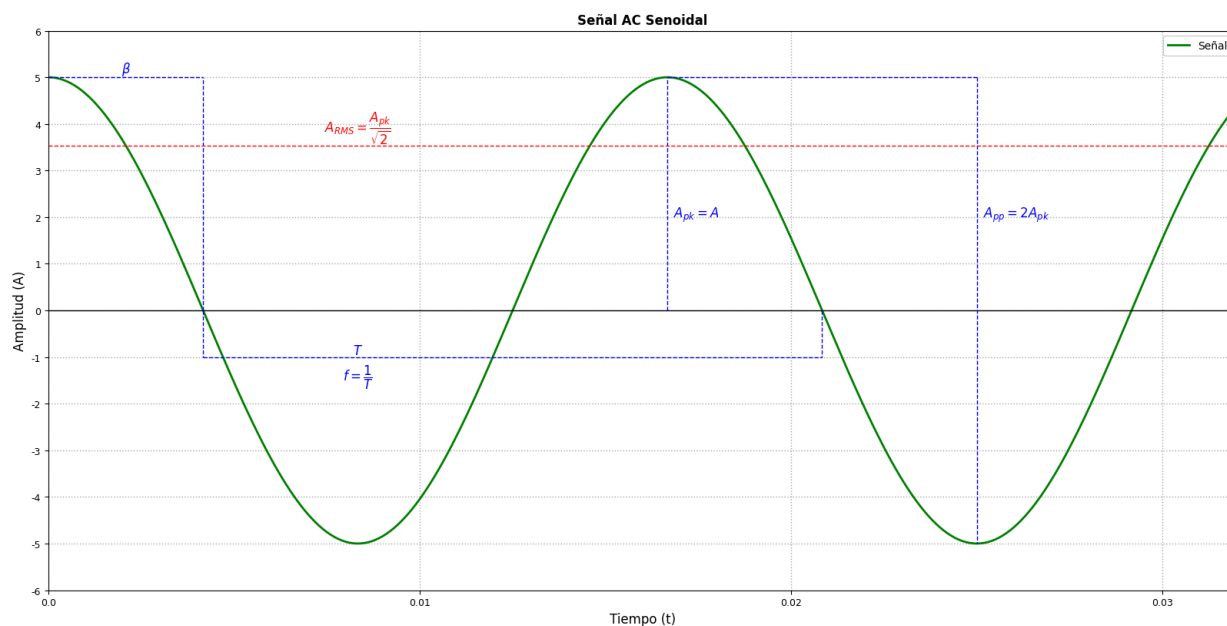
**Nota:** Señal AC senoidal típica de la red eléctrica. La tensión y la corriente varían su valor en el tiempo según la función senoidal.

A diferencia de las señales DC, el modelamiento y cálculo de las variables eléctricas depende del tipo de señal. Sin embargo, las ecuaciones de la Tabla 4 siguen siendo válidas para el cálculo de las variables eléctricas en instantes de tiempo, inclusive existiendo una equivalencia, a partir de los valores eficaces de las señales eléctricas, para usarlas en señales AC (Chen, 2004).

En el contexto del proyecto, la señal AC senoidal es la de mayor relevancia debido a que este tipo de señal es la predominante en la red eléctrica. Esta señal, que se clasifica como periódica de amplitud constante, y la cual puede ser analógica o discreta, se deriva de la función trigonométrica senoidal, la cuál se define en el dominio temporal según la Ecuación 9 y cuyos parámetros se muestran en la Figura 6.

$$a(t) = A \cdot \sin(\omega t + \beta) \quad (9)$$

**Figura 6**  
*Señal AC Senoidal*



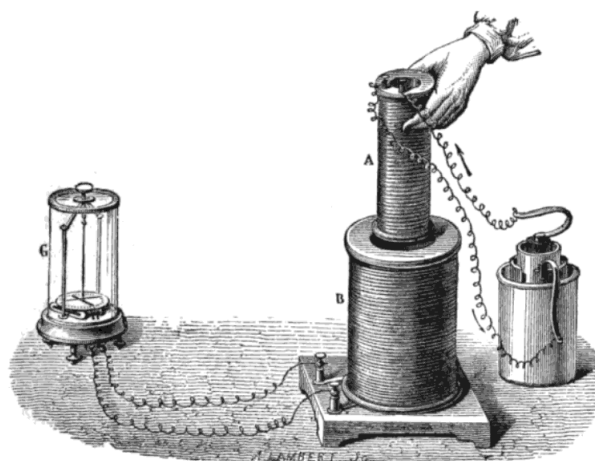
**Nota:** Señal AC Senoidal con sus características principales: Amplitud  $A$ , Frecuencia y Periodo  $\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T}$  y Fase  $\beta$ . Nótese el cálculo del valor eficaz  $A_{rms}$ , equivalente al valor DC que produce la misma potencia (Chen, 2004)

## Fenómenos Electromagnéticos

Debido a la física del electrón, existe una relación y dependencia directa entre el campo eléctrico  $E$  y el campo magnético  $H$  siendo posible observar macroscopicamente la interacción entre ambos. Michael Faraday descubrió que al circular una corriente eléctrica de intensidad  $I$  a través un conductor, se produce un flujo magnético  $\phi_B$  cuya densidad de campo magnético  $B$  es perpendicular a la dirección de la corriente eléctrica. Pero también observó que el proceso es reversible. Bajo ciertas circunstancias, se puede inducir la circulación de una corriente eléctrica a través de un conductor ubicado en el seno de un campo magnético (Poyser, 1892).

### Figura 7

*Experimento de Faraday*



**Nota:** Una corriente circula a través de una bobina, la cual genera un campo magnético. Al moverla dentro de la bobina mayor, se induce una corriente eléctrica en la segunda bobina.

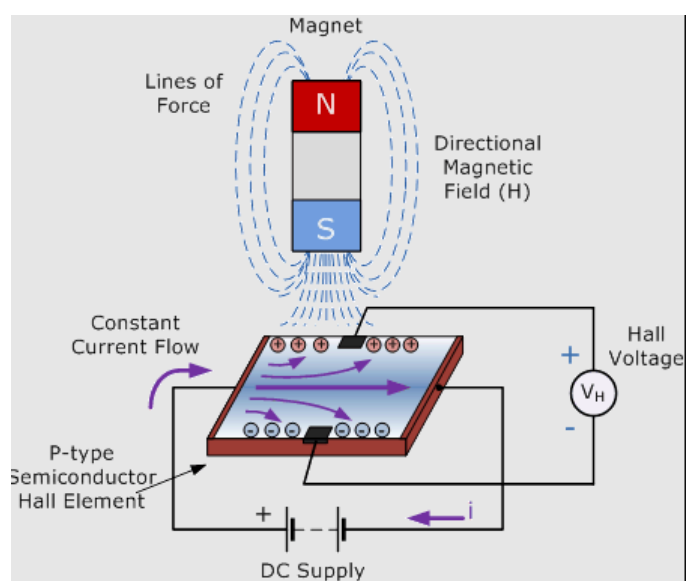
Fuente: Poyser (1892)

A partir de lo descrito anteriormente, existen dos fenómenos electromagnéticos que son aprovechados en los circuitos eléctricos y la instrumentación electrónica por lo que es esencial su conocimiento y la comprensión del funcionamiento físico de los dispositivos basados en estos fenómenos.

## Efecto Hall

La observación de Faraday referente a la generación de un campo magnético a partir de una corriente eléctrica es la fundamentación física de dispositivos como los electroimanes (Poyser, 1892). Sin embargo, dicho principio físico tiene otra aplicación usada ampliamente en instrumentación electrónica: el Efecto Hall (AspenCore, 2022b).

**Figura 8**  
Efecto Hall



**Nota:** Principio de funcionamiento físico del efecto Hall en el cual se produce, en un material semiconductor, una deflexión de cargas eléctricas producida por un campo magnético externo.  
Fuente: AspenCore (2022b).

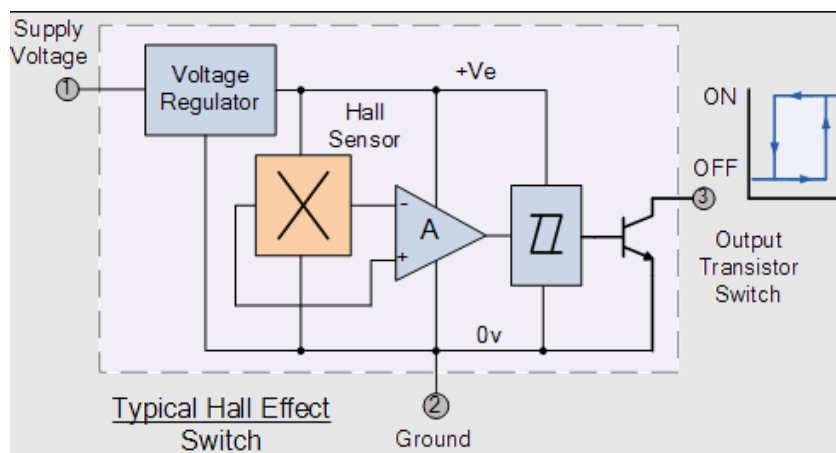
Como lo muestra AspenCore (2022b), el efecto Hall se produce cuando un campo magnético de densidad constante o variable  $B$ , el cual puede ser producido por un imán o una corriente eléctrica  $I$ , atraviesa perpendicularmente a un semiconductor por el cual circula una corriente eléctrica constante (corriente de Hall)  $I_H$ . El campo magnético produce una deflexión de cargas eléctricas y los electrones se mueven hacia un lado del semiconductor, generando una zona con ausencia de cargas eléctricas negativas (huecos). Así se genera una zona del

semiconductor cargada negativamente y otra cargada positivamente lo que produce una diferencia de potencial eléctrico (Tensión Hall)  $V_H$ . Esta diferencia, aunque de un valor muy pequeño (por debajo del orden de los milivoltios) y dependiente del coeficiente Hall  $k_H$  del semiconductor, es susceptible de medirse al instalar un circuito de acondicionamiento y un voltímetro siguiendo la Ecuación 10. El semiconductor, por lo general de tipo p, suele ser una pieza rectangular de grosor  $d$  que actúa como la sonda Hall y en la cual se produce la deflexión de cargas como tal. Esta sonda se conecta a una fuente de tensión DC para generar la circulación de la corriente de Hall como se evidenció en la Figura 8

$$V_H = k_H \cdot \left( \frac{I_H}{d} \times B \right) \quad (10)$$

El efecto Hall es usado principalmente en sensores de campos magnéticos (Fig. 9) pero también en instrumentación para la medición de tensiones y corrientes tanto DC como AC (Fig. 10).

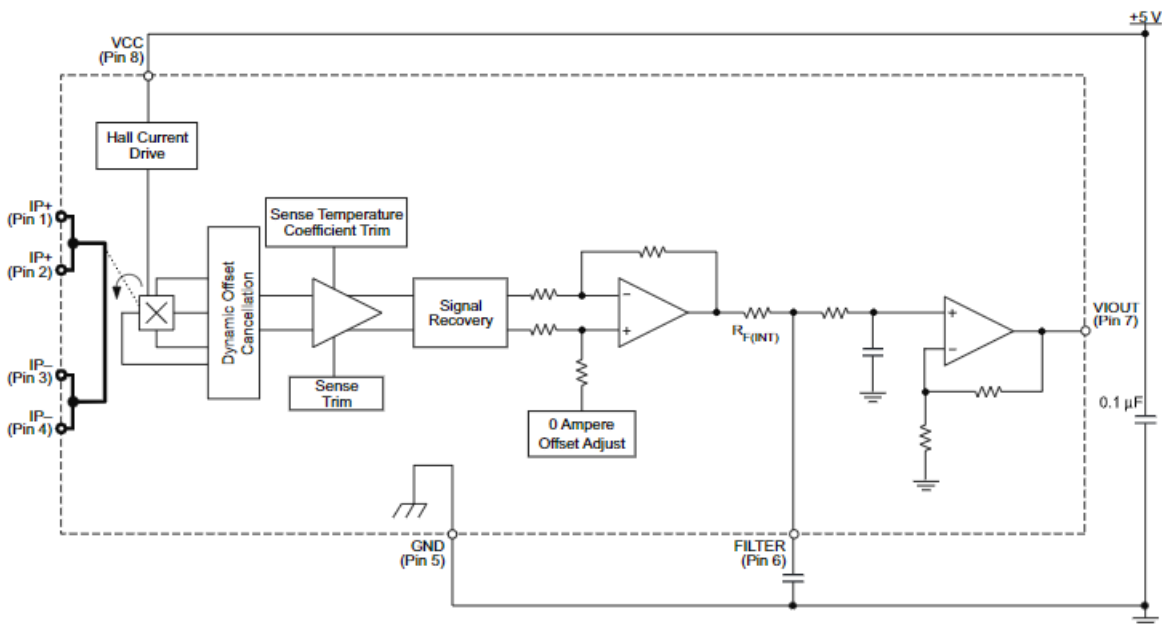
**Figura 9**  
*Sensor de Efecto Hall*



**Nota:** Configuración general de un sensor de efecto Hall. Usados principalmente para la detección y medición de la densidad de campos magnéticos.

Fuente: AspenCore (2022b)

**Figura 10**  
Sensor ACS712

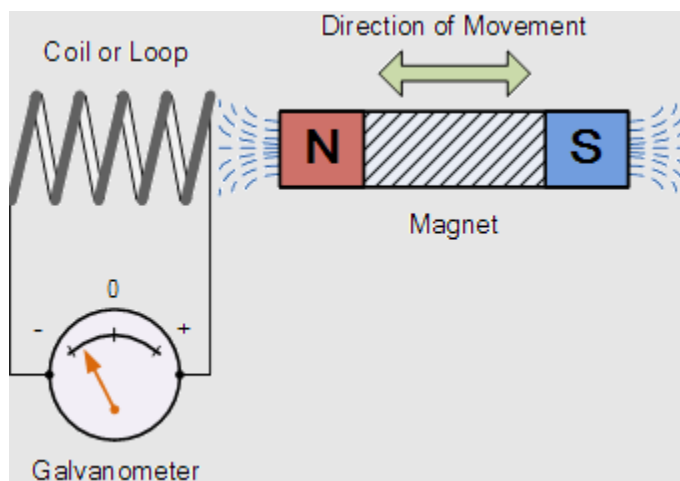


**Nota:** Diagrama de bloques funcional del sensor de efecto Hall ACS712. Usado para la medición de intensidades de corriente DC y AC.  
Fuente: Allegro-Microsystems (2022)

### *Inducción Electromagnética*

La inducción electromagnética es el principio físico de funcionamiento de los generadores y motores eléctricos, transformadores, electroimanes, y otros aparatos electromagnéticos. Este fenómeno se genera a partir de un movimiento relativo de un conductor eléctrico con respecto a un campo magnético, o viceversa, cuando se mueve un imán con respecto a un conductor eléctrico. Dicho movimiento genera una diferencia de potencial eléctrico (tensión) en los extremos del conductor. Al existir una tensión, se producirá una Fuerza Electromotriz (f.e.m) la cuál producirá un movimiento de las cargas eléctricas, en otras palabras, una corriente eléctrica a través del conductor. Así, la inducción electromagnética se usa principalmente para convertir la energía mecánica en energía eléctrica y viceversa (AspenCore, 2022a).

**Figura 11**  
*Inducción Electromagnética*



**Nota:** Principio físico de la inducción electromagnética. Se genera una f.e.m en el inductor a partir del movimiento relativo del imán con respecto al inductor.

Fuente: AspenCore (2022a).

La Ley de Inducción de Faraday se puede definir como sigue (AspenCore, 2022a; Poyser, 1892): Una tensión o Fuerza Electromotriz  $\varepsilon$  es inducida en un conductor de área transversal  $S$  y vueltas  $N$  cuando existe un movimiento relativo entre el conductor eléctrico y un campo magnético externo  $B$ .  $\varepsilon$  impulsa el movimiento de las cargas eléctricas generando una corriente eléctrica de intensidad  $I$ , la cual es proporcional a la tasa de cambio del flujo magnético  $\phi_B$  (Eq. 11).

Adicional a lo anterior, se observó que la f.e.m inducida siempre se oponía a la causa que la generaba, por lo que el sentido de la corriente eléctrica generada por la f.e.m inducida será contrario al sentido del flujo del campo magnético que induce la f.e.m

$$\varepsilon = -N \cdot \frac{d\phi_B}{dt} \quad (11)$$

$$\phi_B = B \cdot S \cdot \cos \theta$$



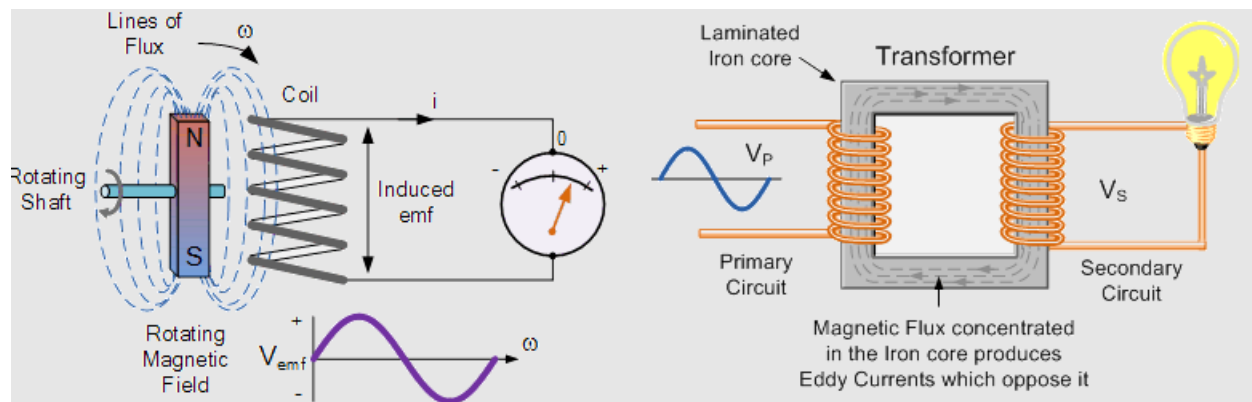
Es importante resaltar que la inducción electromagnética no solamente ocurre cuando existe un movimiento mecánico de los objetos (imán o conductor), pues el principio físico se fundamenta en el movimiento relativo entre un campo eléctrico y un campo magnético. Esto significa que generando una variación del campo eléctrico frente a un campo magnético, o viceversa, se genera una inducción electromagnética, pues variar un campo eléctrico o campo magnético significa variar la magnitud y dirección de flujo de las cargas eléctricas lo que se traduce en manipular su movimiento.

De lo anterior, es posible generar una inducción electromagnética a partir de tres métodos principales:

- I. Generando un desplazamiento de un imán con respecto a un conductor eléctrico fijo (Campo magnético variable) (Fig. 12 Izq.)
- II. Generando un desplazamiento de un conductor con respecto a un imán fijo (Campo eléctrico variable) (Fig. 12 Izq.)
- III. Generando una corriente variable a través de un conductor eléctrico con respecto a un conductor eléctrico fijo (Campo magnético variable a partir de un campo eléctrico variable) (Fig. 12 Der.)

siendo los primeros dos el fundamento físico de motores y generadores, y el tercero el de los transformadores eléctricos. Se resalta que la inducción electromagnética no ocurre con imanes o conductores cuyo desplazamiento sea nulo o conductores por los cuales circula una corriente DC.

**Figura 12**  
Métodos de Inducción Electromagnética



**Nota:** Métodos para la generación de la inducción electromagnética. Izq) Método por desplazamiento o movimiento mecánico. Der) Método por variación de campo eléctrico (Señales AC)

Fuente: AspenCore (2022a)

## Consumo Eléctrico

Se define el consumo eléctrico  $U_E$  como la cantidad de potencia eléctrica  $P$  que se consume en una (1) h en un circuito eléctrico (Endesa, 2021). De forma más general, la cantidad de energía eléctrica usada en un determinado periodo de tiempo. A pesar de que la unidad de medida en el S.I para la energía eléctrica (y por ende, para el consumo eléctrico) es el julio (J), y el cual equivale a  $1 \text{ W} \cdot \text{s}$ , en el sector eléctrico predomina la unidad de vatio por hora (Wh), o sus múltiplos como el kilovatio por hora (kWh) y megavatio por hora (MWh), para el cálculo del consumo eléctrico de un aparato o instalación eléctrica en función de sus variables eléctricas de tensión, corriente y potencia eléctrica. El factor de conversión de vatio por hora (Wh), a julio (J) es  $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$ .

El método más extendido para el cálculo del consumo eléctrico de un aparato o instalación eléctrica es el método acumulativo horario en el cual se multiplica  $P$  por 1 hora. A partir de esa premisa se puede calcular el consumo eléctrico en cualquier unidad de tiempo para determinar los

costos del consumo de una instalación (Endesa, 2021; Rodriguez-Litardo & Luna-Cruz, 2019).

Para ilustrar el modelamiento del consumo eléctrico a partir de ese método, se presenta un ejemplo en el Anexo 2.

El segundo método de la estimación del consumo eléctrico, es el método acumulativo instantáneo en el cual se calcula la cantidad de energía eléctrica  $U_E(t)$  usada en 1 s para posteriormente realizar la sumatoria de los valores instantáneos, obteniendo como resultado la cantidad total  $U_E$  de energía eléctrica usada en un determinado periodo de tiempo  $T$  según la Ecuación 12 (Chen, 2004). Si se desea obtener los resultados en unidades de Wh, se aplica la Ecuación 13. Lo anterior gracias a la equivalencia de  $1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$ . Este método, al ser mas preciso que el anterior, es usado principalmente por los dispositivos de medición del consumo eléctrico los cuales miden tensión e intensidad de corriente y calculan la potencia y energía eléctrica instantánea cada 1 s, para luego computar el acumulado de consumo eléctrico.

$$U_E(t) = \sum_{t=0}^T P_t \cdot 1s \text{ [J]} \quad (12)$$

$$U_E = \frac{U_E(t)}{3600} \text{ [Wh]} \quad (13)$$

## Mediciones, Instrumentación y Control Electrónico

Las variables físicas se dividen en dos grupos: Las magnitudes físicas, las cuales se cuantifican a través de la medición con transductores, y las cantidades derivadas, las cuales se calculan matemáticamente a partir de las magnitudes físicas (BIPM, 2022).

Un transductor es un dispositivo que convierte una manifestación o magnitud de una energía en otro tipo de energía (Granda & Mediavilla, 2010). Estos dispositivos se pueden clasificar en tres categorías (Tab. 5), según la relación de entrada-salida entre las energías, y los cuales posibilitan la interacción que tienen los sistemas artificiales tanto con su entorno como entre diferentes tipos de sistemas.

Es fundamental comprender los procesos que rodean las mediciones eléctricas. Debido a que la carga eléctrica es una propiedad física, se puede observar y medir través de la magnitud física de la intensidad de corriente eléctrica  $I$ , la cual se mide en la unidad fundamental del amperio (A), y que se corresponde con todos los fenómenos eléctricos. Lo anterior significa que para obtener información cuantificable de un sistema eléctrico, se debe realizar una medición directa sobre su intensidad de corriente. A partir de esta magnitud, y gracias a los diferentes principios físicos que gobiernan los fenómenos eléctricos, es posible calcular y cuantificar las otras variables eléctricas. Por consiguiente, es importante conocer los métodos de medición y calculo de estas variables para comprender los diferentes procesos que se generan en la instrumentación electrónica, la cuál es una de las bases fundamentales del proyecto.

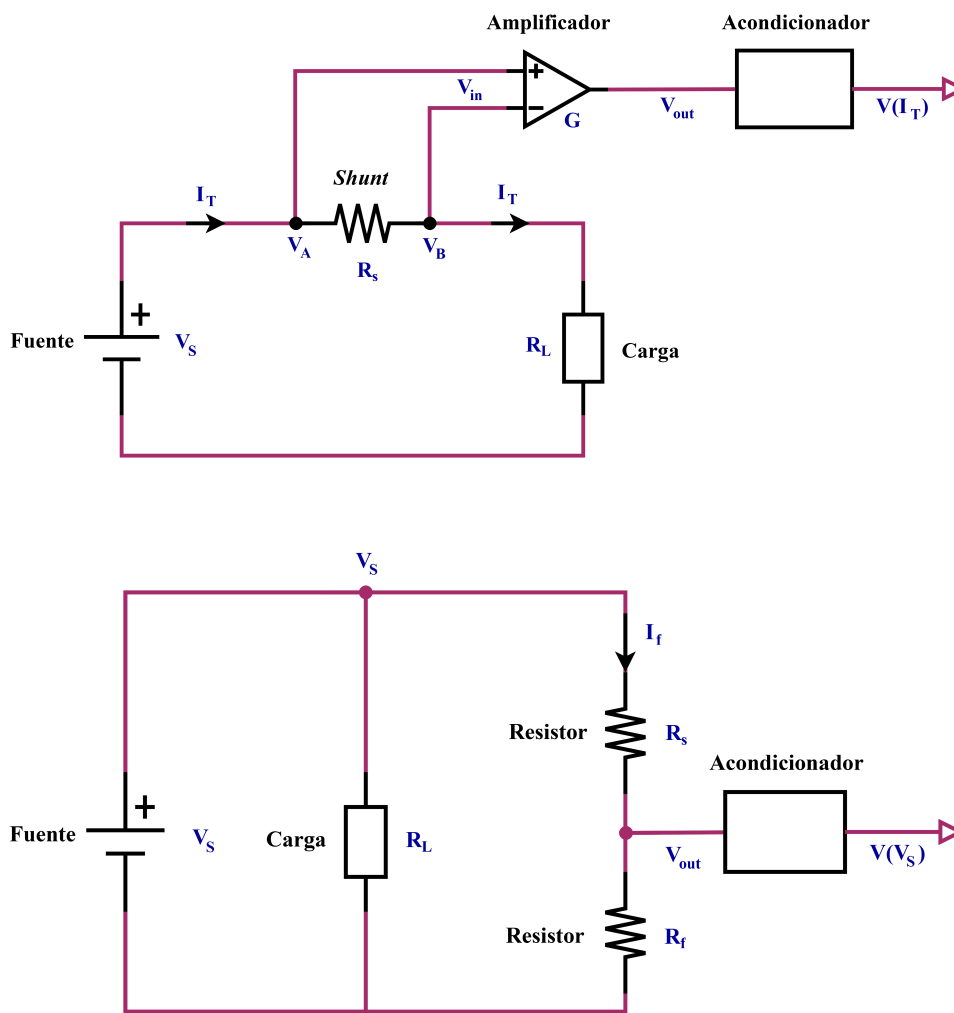
**Tabla 5***Tipos de transductores y sus funciones*

<b>Tipo</b>	<b>Relación</b>	<b>Función</b>
Sensor	Magnitud de entrada - Señal de salida	Interacción con la magnitud física (sensado) para generar una señal de salida equivalente para su procesamiento
Actuador	Señal de entrada - Magnitud de salida	Recibe una señal de control de entrada y la convierte en una energía de salida la cual interactúa con la magnitud física
Transmisor	Magnitud o señal de entrada - Magnitud o señal de salida	Convierte una energía de entrada en una energía de salida equivalente con el fin de acoplar sistemas de diferentes energías

**Nota:** Se presentan los tres tipos de transductores según la relación existente entre las entradas y salidas

En la práctica se siguen los principios físicos expuestos en *Elementos y Variables Eléctricas* para la medición directa de la intensidad de corriente e indirecta de la tensión conformando los siguientes tres métodos principales para la medición de la corriente y tensión, en los cuales los sensores de corriente se ubican en serie con el circuito a medir y los sensores de tensión se ubican en paralelo:

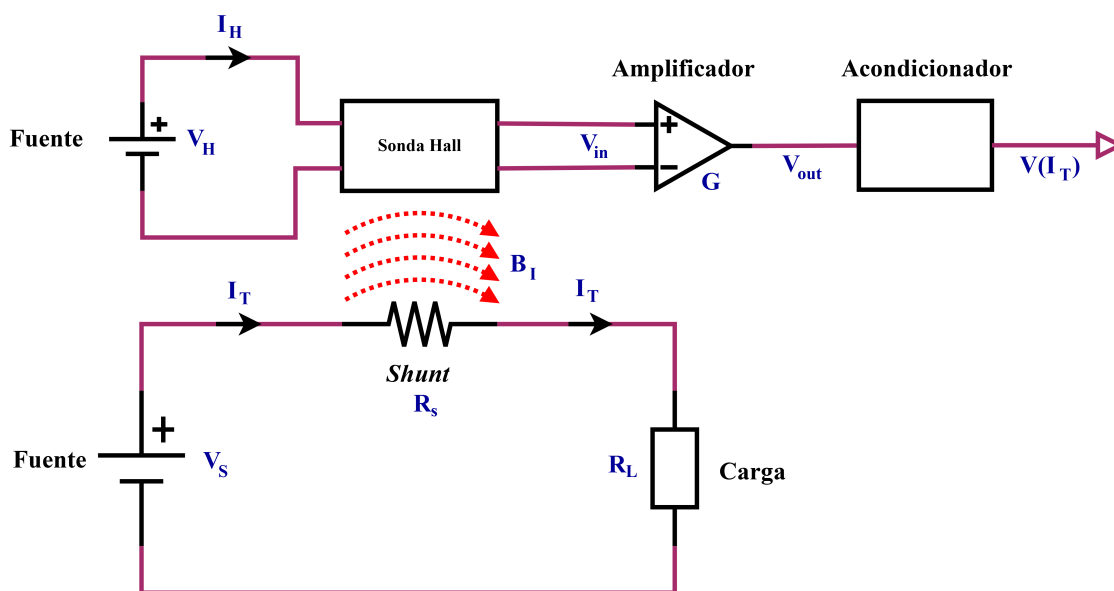
- I. Basado en las leyes de Ohm y de Kirchoff, el método resistivo se basa en la ubicación de un resistor en serie Shunt o un divisor resistivo de tensión en paralelo, para la medición de corriente y tensión respectivamente de un circuito o componente (Tumanski, 2006; UNAD, s.f). El método resistivo es usado principalmente para señales eléctricas DC pero se puede acondicionar para señales AC.

**Figura 13***Método Resistivo para medición de corriente y tensión*

**Nota:** Arriba) Método Shunt para medir intensidad de corriente. Abajo) Método del divisor resistivo para medir tensión.

- II. Gracias a los fenómenos electromagnéticos, se puede aprovechar el efecto Hall para la medición de la intensidad de corriente, sea DC o AC, a través de módulos integrados de sensores que aprovechan este efecto (Allegro-Microsystems, 2022).

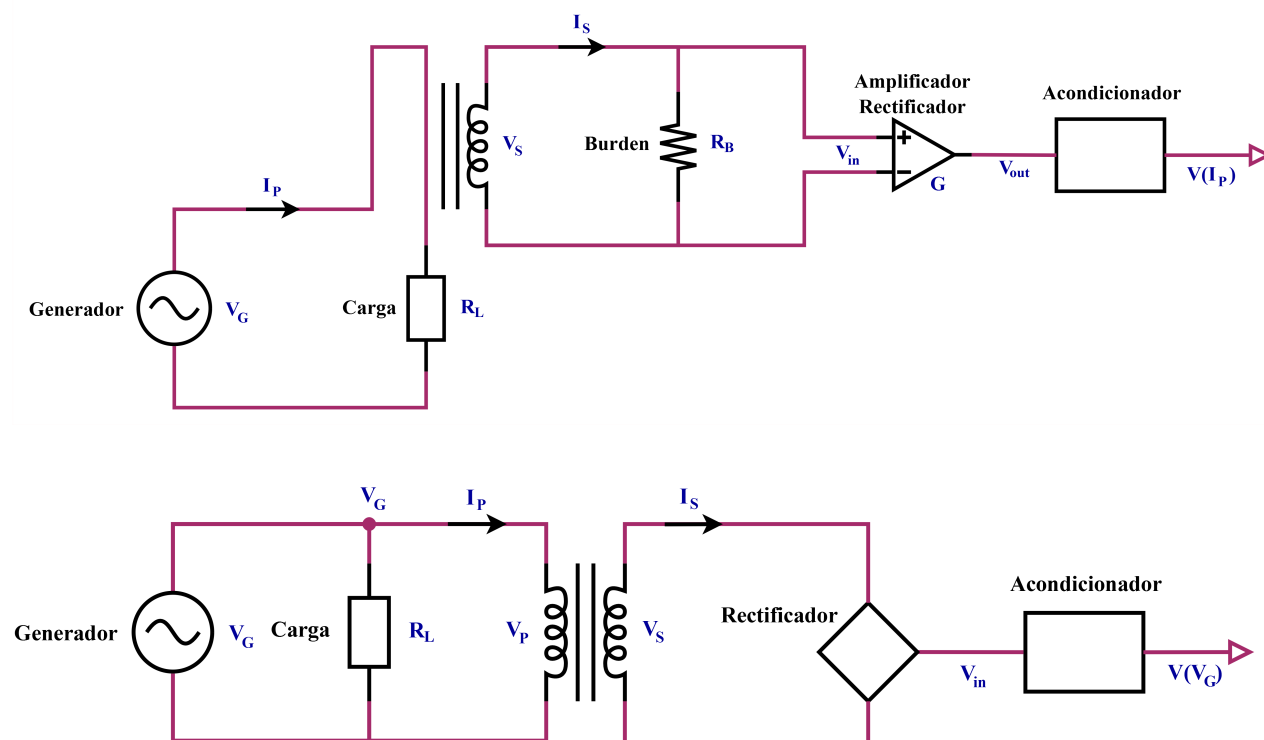
**Figura 14**  
Método por Efecto Hall



**Nota:** Método por efecto Hall para la medición de corriente.

III. La inducción electromagnética se puede aprovechar para la medición de señales AC tanto de corriente como de tensión (Elkor-Technologies, 2006; UNAD, s.f). Los Transformadores de Corriente (TC), los Transformadores de Corriente No Invasivos (TCNI) y los Transformadores de Tensión (TT) hacen uso de ese fenómeno para la medición de corriente y de tensión, agregando la ventaja del aislamiento galvánico.

**Figura 15**  
Método por Inducción Electromagnética



**Nota:** Método por inducción electromagnética para la medición de corriente y tensión con aislamiento galvánico. Arriba) uso de un TC para la medición de intensidad de corriente AC. Abajo) uso de un TT para la medición de tensión AC.

Es importante resaltar que debido a la instrumentación electrónica actual, las señales de transducción son principalmente de tensión, por lo general de valores estandarizados (TTL, MOS, PLC, etc). En otras palabras, por lo general, los sensores, actuadores y controladores electrónicos modernos reciben, entregan y trabajan con señales analógicas y/o digitales de tensión (Granda & Mediavilla, 2010; Tumanski, 2006; UNAD, s.f)

Al combinar un sensor de corriente y un sensor de tensión en un mismo sistema de instrumentación, obteniendo ambas mediciones y aplicando la ley de Watt (Eq. 6), se obtiene el calculo de la potencia eléctrica del circuito eléctrico. Y a partir de ese resultado, siguiendo lo



expuesto en *Consumo Eléctrico*, es posible calcular el consumo de un aparato o circuito eléctrico en un periodo de tiempo determinado. Por lo tanto, se puede concluir que para el cálculo de las variables eléctricas se requiere un sensor para la medición de la corriente eléctrica y otro sensor para la obtención del valor de tensión, y un dispositivo de computo para el calculo de las demás variables eléctricas derivadas.

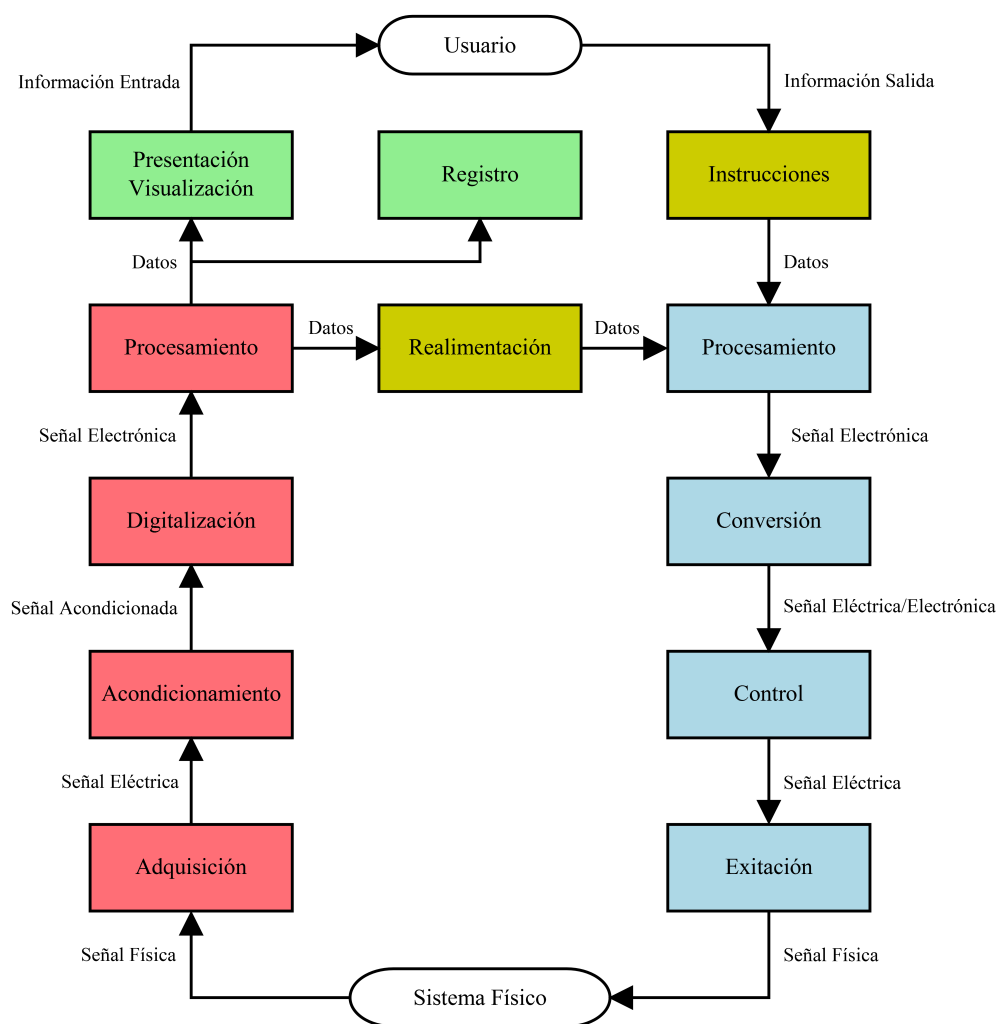
Es importante conocer los procesos que se han normalizado en las áreas de la instrumentación y el control electrónico (Carmona y col., 2012; Granda & Mediavilla, 2010; Tumanski, 2006; UNAD, s.f) los cuales se resumen como se muestra en la Figura 16.

Se pueden identificar cuatro procesos sistemáticos, cada uno con sus respectivos procedimientos, los cuales pueden variar según la aplicación del sistema de instrumentación y control electrónico:

- I. **Origen y Destino:** Se especifican los sistemas de origen y de destino de la información. Por lo general, el sistema físico se considera el origen de la información, pues es en este en el cual se producen las interacciones de las magnitudes físicas y donde se encuentran las variables a medir y/o controlar. Entre tanto, el cliente o usuario, que puede ser un equipo, una maquina, otro sistema o una persona, se toma como el destino de la información, pues es quien la requiere para efectuar otras acciones y toma de decisiones.
  
- II. **Sistema de Instrumentación:** Se realiza los procedimientos de adquisición de las señales de las magnitudes físicas (transductores y sensores), su acondicionamiento y modificación para su tratamiento (atenuación, amplificación, aislamiento, filtrado y conversiones), su digitalización para poderlas trabajar con sistemas electrónicos (conversión ADC) y su procesamiento para la obtención de información usable (controladores y procesadores).

- III. **Sistema de Control e Instrucciones:** Se realiza los procedimientos de la generación de las instrucciones de control, que pueden ser automatizadas a través de procedimientos de realimentación o generadas por el usuario; el procesamiento de estas instrucciones para la generación de las respectivas señales de control; las respectivas conversiones para entregar señales electrónicas (digitales) o eléctricas (analógicas); el procedimiento de control efectuado sobre los actuadores; y la excitación del sistema físico ya sea para generar un interacción con o para la corrección y control de los niveles de las magnitudes físicas.
- IV. **Interacciones:** Existen tres principales interacciones entre los elementos de un sistema de instrumentación y control: 1) La interacción entre dispositivos para la comunicación de señales y datos entre estos. 2) La interacción entre el sistema y los clientes (maquina, equipos, otros sistemas) para la comunicación de la información requerida por estos clientes. 3) La interacción entre el sistema y los usuarios para la comunicación de la información usable y comprensible para los humanos. Existen diferentes métodos de realizar las anteriores interacciones, las cuales se resumen en cuatro procedimientos: transducción de señales; y presentación, visualización y registro de la información.

**Figura 16**  
*Etapas de Instrumentación y Control Electrónico*



**Nota:** Blanco, origen y destino de la información. Rojo, etapas de instrumentación. Azul, etapas de control. Amarillo, instrucciones. Verde, interacciones de la información.

### Validación Experimental y Análisis de Información

La validación experimental es relevante en los proyectos de desarrollo tecnológico al contrastar los resultados prácticos obtenidos con la teoría o la hipótesis planteada en la etapa de diseño. Por lo general esta validación se obtiene de un análisis estadístico entre los datos teóricos planteados, simulaciones realizadas con software especializado, los resultados experimentales

obtenidos y comprobaciones de estos resultados con la instrumentación respectiva. Por lo tanto, para lograr unos resultados óptimos y precisos, es fundamental tener presente las características estáticas de los instrumentos, así como los diversos factores de error que pueden incidir en el planteamiento teórico, en las simulaciones, en las mediciones experimentales y en los instrumentos (Ardila, 2007; Carmona y col., 2012; Granda & Mediavilla, 2010; Tumanski, 2006; UNAD, s.f).

Para la validación experimental del proyecto, especialmente en lo referente al uso de la instrumentación, se tendrán presentes principalmente las cualidades de las mediciones que se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6**  
*Cualidades de las mediciones*

<b>Cualidad</b>	<b>Descripción</b>
Exactitud	La proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando o la proximidad entre los valores medidos atribuidos al mensurando
Precisión	La proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas
Veracidad	Proximidad entre la media de un número infinito de valores medidos repetidos y un valor de referencia
Error	Diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia
Incertidumbre	Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos al mensurando, a partir de la información que utiliza

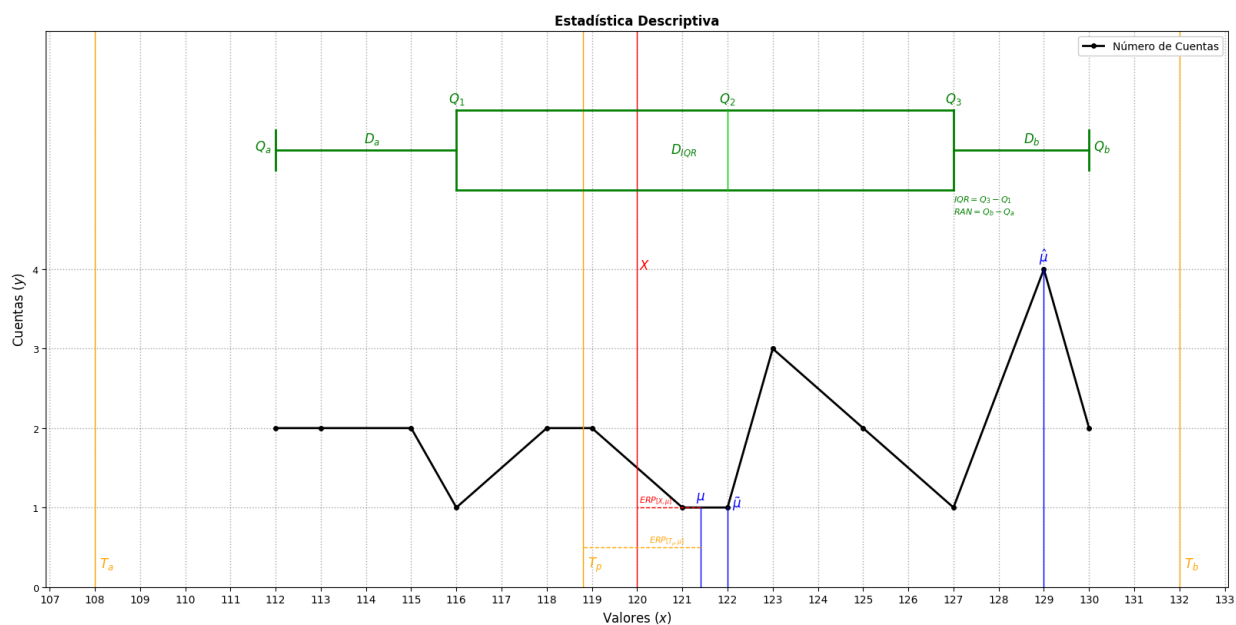
**Nota:** Cualidades principales para la caracterización de las mediciones.  
Fuente: CEM (2012)

Entre tanto, para el análisis de la información generada en la validación experimental, se plantea la aplicación de las siguientes técnicas estadísticas (Ardila, 2007; Espinoza-Montes, 2010; Torres-Payoma, 2019; Urbano & Yuni, 2006):

### ***Estadística Descriptiva***

Uso de técnicas de tendencia central, posición y aproximaciones las cuales brindan información acerca de la tendencia de las mediciones para determinar su veracidad, precisión y aproximación frente al valor esperado y las tolerancias establecidas.

**Figura 17**  
*Ejemplo de la Estadística Descriptiva*



**Nota:** Ejemplo de la estadística descriptiva. Se muestra el número de cuentas  $y$  obtenidas por cada valor único  $x$  de la población  $N$ . Rojo, valor esperado. Amarillo, tolerancias establecidas. Azul, variables estadísticas de tendencia central. Verde, gráfica *Boxplot* con las variables estadísticas de posición

**Tabla 7**  
*Variables estadísticas descriptivas*

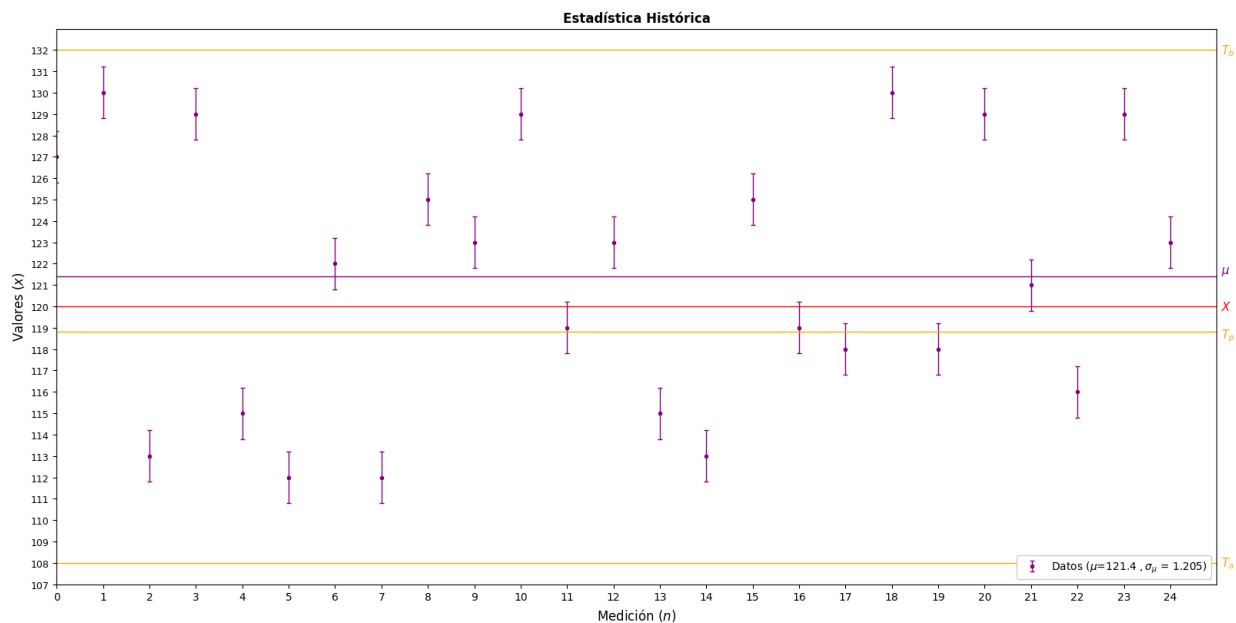
Variable	Símbolo	Ecuación
Dato	$i$	Cada par $i = (n, x)$ de valores numéricos obtenidos
Población de mediciones	$N$	Cantidad total de $i$
Valor único	$x$	Valor numérico único
Cuentas o Frecuencias absolutas	$y$	Cantidad de muestras por cada $x$
Valores	$N_x$	Cantidad total de $x$
Valor Esperado	$X$	Valor numérico ideal
Tolerancia Mínima	$T_a$	$T_a = X + (X \cdot a)$
Tolerancia Media	$T_p$	$T_p = X + (X \cdot p)$
Tolerancia Máxima	$T_b$	$T_b = X + (X \cdot b)$
Media Aritmética (Promedio)	$\mu$	$\mu = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N_x} (x_n \cdot y_n)$
Mediana ( $N = \text{impar}$ )	$\tilde{\mu}$	$\tilde{\mu} = i_M \text{ con } M = \frac{N + 1}{2}$
Mediana ( $N = \text{par}$ )	$\tilde{\mu}$	$\tilde{\mu} = \frac{i_M + i_{M+1}}{2} \text{ con } M = N/2$
Moda	$\hat{\mu}$	$\hat{\mu} = \text{MAX}(y)$
Mínimo	$Q_a$	$Q_a = \text{MIN}(x)$
Cuartil 1	$Q_1$	$Q_1 = \tilde{\mu}_{[Q_a, \tilde{\mu}]}$
Cuartil 2	$Q_2$	$Q_2 = \tilde{\mu}$
Cuartil 3	$Q_3$	$Q_3 = \tilde{\mu}_{[\tilde{\mu}, Q_b]}$
Máximo	$Q_b$	$Q_b = \text{MAX}(x)$

Variable	Símbolo	Ecuación
Rango	$RAN$	$RAN = Q_b - Q_a$
Rango Intercuartil	$IQR$	$IQR = Q_3 - Q_1$
Distribución de Cuentas Mínimo	$D_a$	$D_a = \frac{1}{N} \sum_{n=y(Q_a)}^{y(Q_1-1)} y_n$
Distribución de Cuentas IQR	$D_{IQR}$	$D_{IQR} = \frac{1}{N} \sum_{n=y(Q_1)}^{y(Q_3)} y_n$
Distribución de Cuentas Máximo	$D_b$	$D_b = \frac{1}{N} \sum_{n=y(Q_3+1)}^{y(Q_b)} y_n$

**Nota:** Variables principales usadas en estadística descriptiva

### *Estadística Histórica*

Comparación y análisis de cada una de las mediciones obtenidas frente al valor esperado  $X$ , la media aritmética representativa del conjunto de mediciones  $\mu$  y las tolerancias  $T_a$ ,  $T_p$  y  $T_b$  establecidas para conocer la evolución temporal de los datos  $i$  del conjunto de mediciones. En la Figura 18 se muestra un ejemplo de la estadística histórica.

**Figura 18***Ejemplo de la estadística histórica.*

**Nota:** Se muestra cada par de datos  $i = (n, x)$ , el promedio representativo  $\mu$  de la población  $N$ , y el error estándar  $\sigma_\mu$  representado por las barras de error

### ***Distribución de Gauss y Función de Densidad de Probabilidad***

La Distribución de Gauss es usada en diversas áreas del conocimiento para el modelamiento estadístico y probabilístico de fenómenos naturales (Ardila, 2007; Granda & Mediavilla, 2010; Torres-Payoma, 2019; Tumanski, 2006; UNAD, s.f). Uno de sus modelos matemáticos es la Función de Densidad de Probabilidad (PDF) (Eq. 14), la cual se representa como se muestra en la Figura 19 (Torres-Payoma, 2019). La distribución de Gauss determina que entre mayor sea el valor de  $P(x)$ , mayor ocurrencia tendrá el valor  $x$ ; entre más cercano el valor del centroide  $\mu$  al valor esperado o de referencia  $X$ , mayor será la veracidad de las mediciones; y entre más cercano sea el valor de  $\sigma$  a 0, mayor será la precisión de las mediciones.

$$P(x) = Ae^{\zeta(x)} + M(x) \quad (14)$$



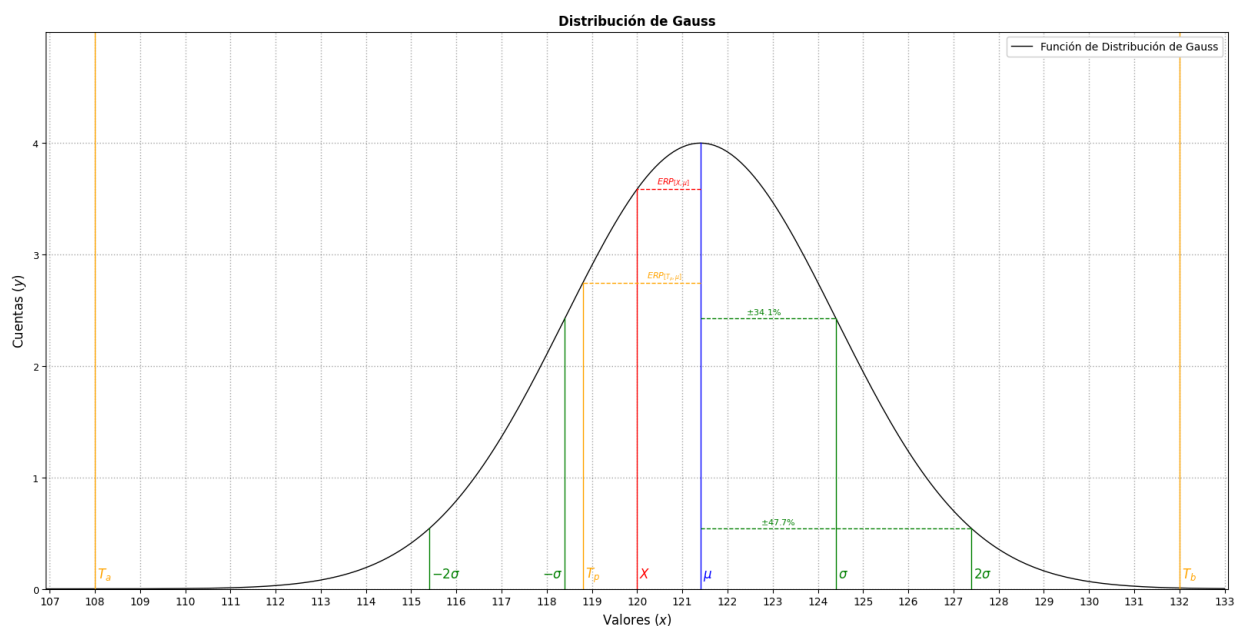
$$\varsigma(x) = -\frac{1}{2} \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2$$

$$M(x) = mx + y_0$$

$M(x)$  se corresponde con el fondo que puede presentar la población de mediciones, y el cual debe tenerse en cuenta priori a la generación de la Distribución de Gauss

### Figura 19

*Ejemplo de la Distribución de Gauss*



**Nota:** Ejemplo de la Distribución de Gauss. Se muestra la curva característica de la Distribución de Gauss (sin fondo). Azul, el centroide. Rojo, el valor esperado. Amarillo, las tolerancias establecidas. Verde, el valor para 1 (68.2 % de los valores,  $\pm 34.1\%$ ) y 2 (95.4 % de los valores,  $\pm 47.7\%$ ) desviaciones estándar de la distribución.

**Tabla 8**  
*Variables estadísticas de la Distribución de Gauss*

Variable	Símbolo	Ecuación
Dato	$i$	Cada par $i = (n, x)$ de valores numéricos obtenidos
Población de mediciones	$N$	Cantidad total de $i$
Valor único	$x$	Valor numérico único
Cuentas o Frecuencias absolutas	$y$	Cantidad de muestras por cada $x$
Valores	$N_x$	Cantidad total de $x$
Valor Esperado	$X$	Valor numérico ideal
Tolerancia Mínima	$T_a$	$T_a = X + (X \cdot a)$
Tolerancia Media	$T_p$	$T_p = X + (X \cdot p)$
Tolerancia Máxima	$T_b$	$T_b = X + (X \cdot b)$
Desviación Estándar	$\sigma$	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_n - \mu}$
Varianza	$\sigma^2$	$\sigma^2$
Coficiente de Variación	$CV$	$CV = \frac{\sigma}{\mu}$
Error Estándar	$\sigma_\mu$	$\sigma_\mu = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$
Resolución	$RES$	Mínima diferencia apreciable por el instrumento
Incertidumbre	$INC$	$INC = \sqrt{\sigma^2 + RES^2}$
Pendiente	$m$	$m = \frac{y(x_{Nx}) - y(x_0)}{x_{Nx} - x_0}$
Punto de Corte	$y_0$	$y_0 = y(x_0) - m \cdot x_0$

**Nota:** Variables principales usadas en la Distribución de Gauss

### ***Estadística Comparativa***

Comparación numérica, a través de los errores de aproximación absoluto  $E_A$  (Eq. 15), relativo  $E_R$  (Eq. 16) y relativo porcentual  $E_{RP}$  (Eq. 17) (Ardila, 2007; UNAD, s.f), entre los modelos matemáticos, las simulaciones, las mediciones con instrumentación de referencia y las mediciones con el instrumento de prueba para validar la exactitud y confiabilidad del instrumento de prueba.

$$E_A = x_n - X \quad (15)$$

$$E_R = \frac{E_A}{X} \quad (16)$$

$$E_{RP} = E_R \cdot 100\% \quad (17)$$

### **Internet de las Cosas (IoT)**

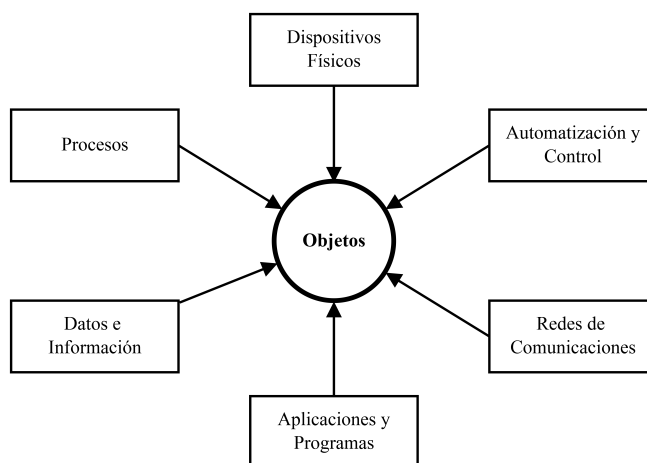
La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) define el IoT como una “Infraestructura mundial para la sociedad de la información que propicia la prestación de servicios avanzados mediante la interconexión de objetos (físicos y virtuales) gracias a la interoperatividad de tecnologías de la información y la comunicación presentes y futuras” (ITU, 2012). El IoT es un paradigma tecnológico que integra e interconecta los objetivos físicos a una red masiva de comunicaciones (CISCO-Networking-Academy, 2019). Lo anterior es posible gracias a diferentes medios y dispositivos como sensores, actuadores, controladores, dispositivos de red, interfaces de usuario, y diversas aplicaciones y programas. La capacidad de generar una red de objetos y magnitudes físicas de un sistema tecnológico susceptibles de gestionarse a través

de redes de comunicaciones hacen al IoT un paradigma tecnológico de gran impacto en la sociedad moderna, permitiendo también automatizar y agregar cierto grado de inteligencia a los sistemas tecnológicos (García-Herrera, 2018; Ramírez-Madrid, 2018).

Para lograr la integración del IoT al proyecto, es importante conocer sus fundamentos, requerimientos y estándares. Como se evidencia en CISCO-Networking-Academy (2019), al estar basado en los objetos, existen diferentes factores (Fig. 20) que hacen posible su conexión a una red de comunicaciones.

### Figura 20

*Factores de Conexión de los Objetos al IoT*



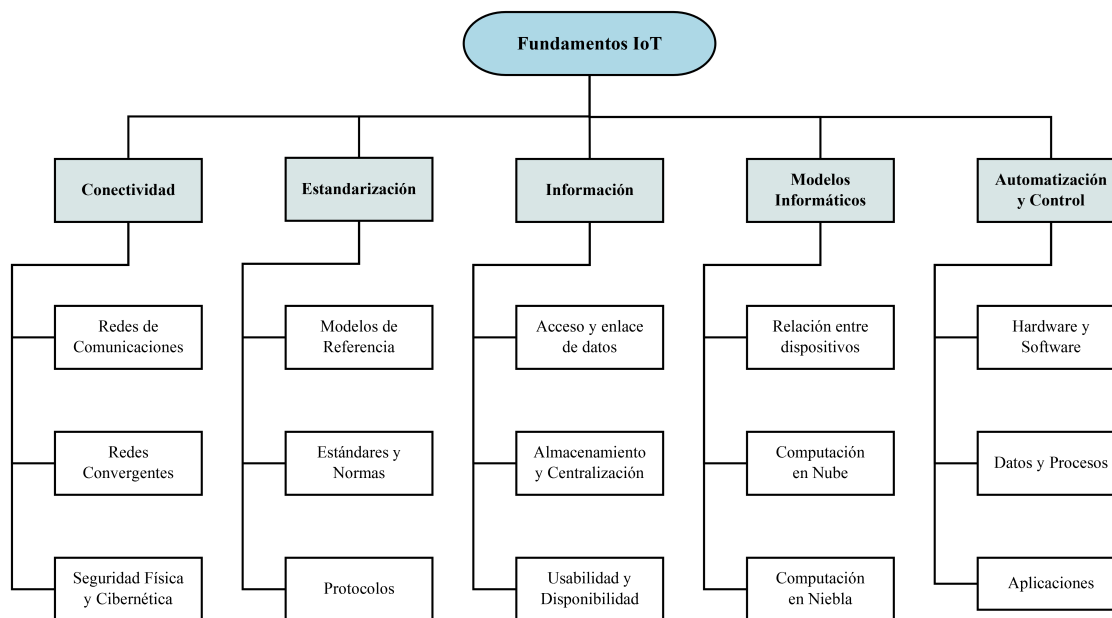
**Nota:** Factores de conexión de los Objetos al IoT. Los diferentes factores que habilitan la conexión de los objetos inanimados a las redes de comunicaciones

Adicional, como se evidencia en Compton y col. (2015), el IoT se ha configurado como un paradigma tecnológico bien conocido y conformado siendo los objetos, el Internet, la computación en Niebla o Perímetro, la conectividad de redes de comunicaciones, el análisis de datos, la seguridad física, la ciberseguridad, la administración y automatización de procesos, las plataformas de habilitación de aplicaciones y la computación en Nube los pilares que fundamentan las soluciones tecnológicas basadas en IoT.

A partir de los factores de conexión de los objetos y los pilares, se establecen los fundamentos del IoT (Fig. 21) y el modelo de referencia (Tab. 9), a partir de los cuales se establecen los requerimientos mínimos para la integración del IoT a una solución tecnológica (CISCO-Networking-Academy, 2019).

Uniendo los factores de conexión de los objetos, los pilares y fundamentos del IoT, y el modelo de referencia, se especifica una arquitectura base para la red de comunicaciones basada en el IoT (CISCO-Networking-Academy, 2019). En la Figura 22 se puede identificar las topologías lógica y física, los dispositivos y conexiones físicas, y las redes de comunicaciones mínimas requeridas para la implementación de las soluciones tecnológicas basadas en el IoT.

**Figura 21**  
*Fundamentos del IoT*



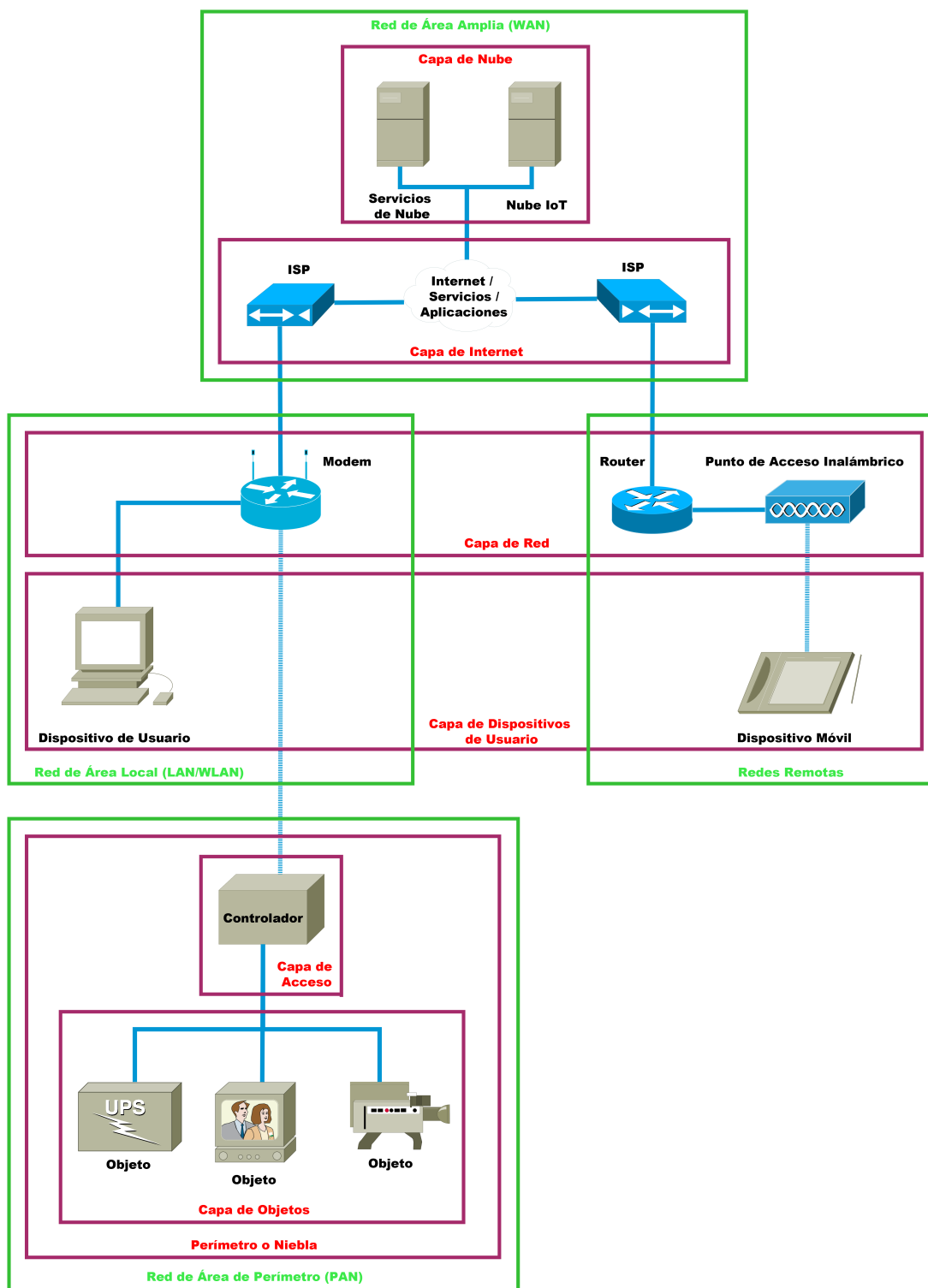
**Nota:** Fundamentos del IoT. La conectividad, los estándares tecnológicos, la gestión de la información, los modelos informáticos y computacionales y la automatización y control conforman los fundamentos del IoT.

**Tabla 9**  
*Modelo de referencia del IoT*

<b>Nivel</b>	<b>Objetos</b>
1. Dispositivos físicos y controladores	1. Las cosas y los objetos físicos
2. Conectividad	2. Unidades de procesamiento y comunicación de los datos y la información
3. Computación perimetral (niebla)	Procesos de análisis y transformación de elementos de datos
4. Acumulación de datos	4. Dispositivos de almacenamiento de datos e información
5. Abstracción de datos	5. Equipos de agregación y acceso a la información
6. Aplicación	6. Proceso y aplicaciones de visualización, informe, procesamiento, análisis, uso y control de la información
7. Colaboración	7. Sistemas, máquinas e interfaces HMI

**Nota:** Modelo de referencia del IoT de CISCO-Networking-Academy (2019)

**Figura 22**  
*Arquitectura Base de Red para IoT*



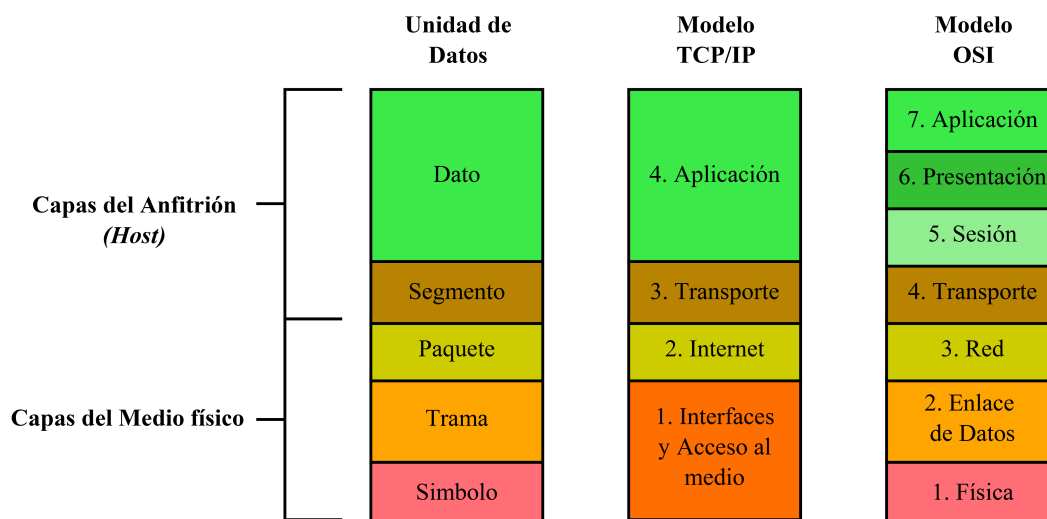
**Nota:** Se muestran los dispositivos físicos, las capas lógicas, los medios, las conexiones y las redes de comunicaciones comunes que conforman la arquitectura de la red base para IoT. A partir de esta base, se pueden especificar redes IoT más complejas.

## Topología Lógica

La topología lógica hace referencia a la organización conceptual o lógica de la red de comunicaciones, existiendo modelos de referencia para las redes de comunicaciones, siendo los más usados el TCP/IP y el OSI (Tomasi, 2003) los cuales se muestran en la Figura 23.

### Figura 23

Modelos de Referencia para las Redes de Comunicaciones



**Nota:** Modelos de referencia para las redes de comunicaciones. Se muestra las unidades de datos que se manejan en las redes de comunicaciones y las capas lógicas de los modelos de referencia TCP/IP y OSI

Sin embargo, debido a la integración de los objetos físicos a las redes de comunicaciones, se hizo necesario agregar un nuevo modelo de referencia para las redes de comunicaciones IoT (CISCO-Networking-Academy, 2019), quedando las capas lógicas estandarizadas para el IoT como sigue:

- **Capa de Objetos:** Es la capa en la cual se genera, a través de los objetos, la interacción con las variables físicas, y por lo tanto, el origen de la información para el sistema de comunicaciones.

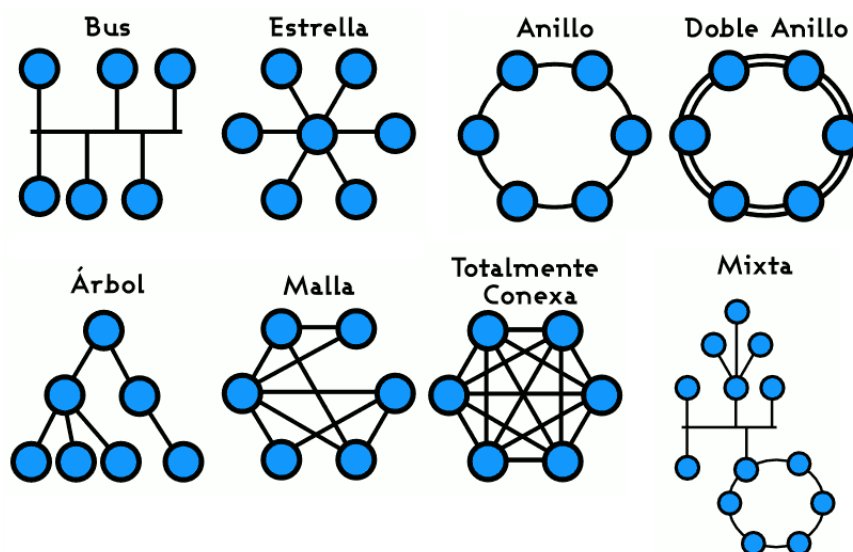


- **Capa de Acceso:** Es la capa en la cual se brinda el acceso de los objetos a la red de comunicaciones para la comunicación de la información generada.
- **Capa de Perímetro:** Conformada por la Capas de Objetos y de Acceso, se configura como la capa mas externa de la red. Adicional, ofrece computación de niebla o perímetro para la automatización de los procesos que realizan los objetos.
- **Capa de Dispositivos de Usuario:** Es la capa en la cual se encuentran los dispositivos con las Interfaces Humano-Maquina (HMI) para la interacción física del usuario con los objetos y el sistema de comunicaciones.
- **Capa de Red:** Es la capa encargada de gestionar todos los protocolos y procesos de red requeridos para enlazar los diferentes dispositivos y posibilitar la comunicación de la información entre estos.
- **Capa de Internet:** Internet es la red masiva global en la cual se producen todos los procesos de red a nivel amplio o global, habilitando, desde cualquier ubicación geográfica, el acceso a los diferentes servicios y aplicaciones del sistema de comunicaciones.
- **Capa de Nube:** Es la capa encargada de ofrecer y gestionar los servicios y las aplicaciones de Nube, es decir, en la cual se encuentra la infraestructura física, los programas, protocolos y servicios que hacen posible la computación en Nube y la centralización de la información para su acceso y uso desde cualquier ubicación geográfica a través de Internet.

## Topología Física

La topología física se enfoca principalmente hacia la organización y distribución espacial de los dispositivos y las conexiones físicas, y la forma en que se interconectan los dispositivos a través de dichas conexiones. La importancia de esta topología radica en la integración del diseño conceptual o lógico de una red con los dispositivos y conexiones físicas, brindando la comprensión de la configuración de la red de comunicaciones en el ámbito aplicado. Existen topologías físicas estándares (Fig. 24) (Tomasi, 2003) las cuales pueden ser implementadas en el IoT dependiendo de la aplicación de la solución tecnológica.

**Figura 24**  
*Topologías Físicas de Red*



**Nota:** Topologías físicas de red. Se muestran las topologías físicas (organización física y espacial de los dispositivos) más comunes en las redes de comunicaciones

Adicional, para el IoT, existen unos dispositivos mínimos para lograr la integración de los objetos a la red de comunicaciones (CISCO-Networking-Academy, 2019):

- **Objetos:** Todo objeto físico susceptible de ser conectado a una red de comunicaciones (Sensores, Actuadores, Dispositivos, Controladores electrónicos.)

- **Componentes de Acceso:** Habilitan el acceso de los objetos a la red de comunicaciones (Controladores electrónicos, Dispositivos de red)
- **Dispositivos de Usuario:** Habilitan la interacción entre los usuarios, el sistema de comunicaciones y los objetos. (Equipos de computo, dispositivos móviles, Interfaces HMI)
- **Dispositivos de Red:** Encargados de la gestión de los procesos de red y comunicaciones entre los diferentes dispositivos del sistema de comunicaciones (*switch, router, WAP, firewall*)
- **Servicios de Internet:** Para el acceso a Internet se requiere un Prestador del Servicio de Internet (ISP). A través de los ISP se habilita el acceso de las redes de comunicaciones a Internet. Para ello se requiere una diversidad de dispositivos de red, software, procesos, infraestructura física y personal.
- **Servicios de Nube:** Al igual que Internet, los Servicios de Nube se fundamentan en infraestructura física, software, procesos, dispositivos de red, personal y hasta en otros servicios de red, para posibilitar la computación en Nube. Su objetivo es ofrecer diferentes servicios y aplicaciones centralizadas y a los cuales se pueda acceder desde cualquier ubicación geográfica desde que se cuente con acceso a Internet.

Igualmente, existen diferentes conexiones, interfaces y protocolos que se implementan en las redes de comunicaciones según sus topologías lógica y física, y la distribución espacial y geográfica de la red. Las conexiones mas comunes que se pueden encontrar en una red de comunicaciones IoT son la cableada a través del medio físico metálico (cableado de cobre, aluminio, oro, etc), la cableada a través del medio electromagnético (fibra óptica) y la inalámbrica

a través de radiofrecuencias. En cuanto a las interfaces físicas y los protocolos utilizados en IoT para la interconexión y comunicación entre los diferentes objetos, dispositivos y redes se encuentran UART, SPI, I2C, RS, Ethernet, Bluetooth, Zigbee, WiFi, Sigfox, LPWAN, LoRaWAN, GSM/GPRS/LTE, Satelital, entre otras (CISCO-Networking-Academy, 2019).

### ***Redes de Comunicaciones en IoT***

Debido al alcance físico que tiene el IoT, se configuran diferentes tipos de redes de comunicaciones según las interacciones que se presentan dentro de la red de comunicaciones IoT, las cuales cumplen diferentes funciones, logrando la integración y conexión de los objetos a la red de comunicaciones IoT (CISCO-Networking-Academy, 2019; Compton y col., 2015; Tomasi, 2003):

- **Red de Área Personal (WPAN/VPN):** Este tipo de redes, por lo general inalámbricas y con una topología punto a punto, se conforman por dispositivos de usuario con un corto alcance, por lo general, inferior a 10 m.
- **Red de Área Perímetro (EAN/WON/WSN):** Este tipo de redes es propia del IoT. Se conforma la capa de Perímetro y sus respectivos dispositivos. Suelen ser las redes mas externas dentro de una red de comunicaciones IoT.
- **Red de Área Local (LAN/WLAN/VLAN):** Por lo general son las redes en las cuales los usuarios interactúan con el sistema de comunicaciones, por lo que se compone de componentes de las capas de dispositivos de usuario y de red.
- **Red de Campus (CAN):** Esta red corresponde con las redes de comunicaciones internas de las instalaciones o edificios, y se pueden conformar por varias redes locales y personales.

- **Red Industrial (IN):** Las redes industriales son redes especializadas para las comunicaciones de las maquinas mas que de dispositivos de usuario. Se puede conformar por una sola red local de maquinas o una gran cantidad de redes distribuidas geográficamente.
- **Red de Área Metropolitana (MAN):** Dentro de un área geográfica, especialmente las urbanas, se puede extender toda una red de comunicaciones. Este tipo de red se usa principalmente para la interconexión de otras redes (personal, perímetro, local, campus e industriales) entre sí.
- **Red de Área Amplia (WAN, WWAN, LPWAN, Internet):** Dentro de un área geográfica amplia (nivel regional o país) y a nivel global, se conforman las redes masivas de comunicaciones, a través de las cuales se interconectan innumerables redes y dispositivos.

### ***Smart Energy Meters - SEM y Tomacorrientes Inteligentes - TI***

Los Medidores Inteligentes de Energía (*Smart Energy Meters - SEM*) son instrumentos electrónicos que efectúan procedimientos de medición, control, y procesamiento de las variables eléctricas, principalmente para gestionar la generación, la distribución y/o el uso de la energía eléctrica. Desde hace varios años, inclusive en Colombia, las instituciones, empresas y usuarios del sector eléctrico han venido reemplazando los medidores convencionales electromecánicos con los SEM debido a sus múltiples ventajas y mayores prestaciones frente a los primeros (ENEL, 2018; MinEnergía, 2022; NEU, 2022):

- Medir de forma remota (telemetría) la corriente eléctrica y la tensión nominal de una instalación, circuito, o aparato eléctrico

- Calcular otras variables eléctricas, como potencia eléctrica, consumo, factor de potencia y frecuencia de las señales eléctricas.
- Protección inteligente y automatizada contra variaciones críticas de las señales eléctrica.
- Comunicación remota de la información obtenida en los procedimientos de medición y calculo de las variables eléctricas.
- Interrumpir remotamente (telecontrol) el flujo de la corriente eléctrica.
- Programarse para efectuar acciones de control automatizadas del consumo eléctrico para aumentar su uso racional y la eficiencia energética.

Los SEM funcionan bajo los conceptos y principios físicos presentados en las secciones anteriores, por lo que es fundamental apropiarse dichos conocimientos para una correcta comprensión del funcionamiento y la operación de los SEM.

Derivado del concepto de los SEM, que se usan principalmente para la gestión del consumo eléctrico a nivel de instalación, se encuentran otros dispositivos inteligentes como los tableros para circuitos ramales, las iluminarias e interruptores para iluminación, y los Tomacorrientes Inteligentes (TI) para los aparatos eléctricos. Estos dispositivos tienen la ventaja de gestionarse de forma remota (telegestión) desde otros dispositivos como equipos de computo o dispositivos móviles. Referente a los TI, estos dispositivos se pueden clasificar de forma general en dos tipos:

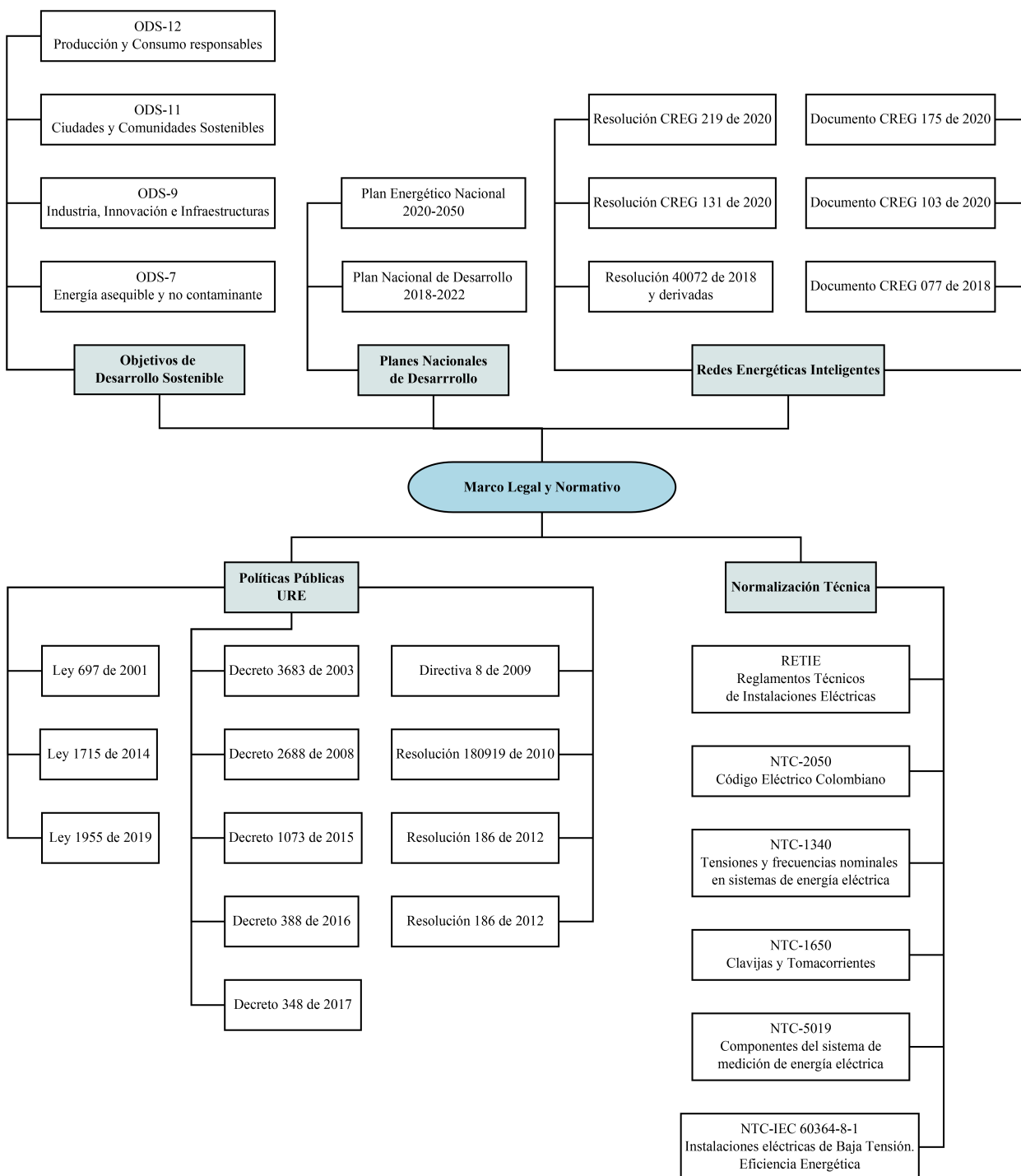
- I. TI y multitomas enfocadas únicamente al telecontrol de los aparatos eléctricos
- II. TI con funciones de telecontrol de los aparatos eléctricos, y telemetría y registro del consumo eléctrico.

Actualmente en el mercado, tanto internacional como nacional, los TI se han enfocado principalmente en el primer tipo. Empero, existen modelos que, adicional a lo anterior, también generan una medición y calculo de las variables eléctricas para que el usuario conozca el consumo eléctrico de los aparatos que se conectan al TI. Todo esto se gestiona por lo general a través de redes WiFi y desde aplicaciones móviles dedicadas para la telegestión del TI.

### **Marco Legal y Normativo**

Es importante para el desarrollo tecnológico enmarcarse dentro de un marco legal, normativo y técnico para el conocimiento de los estándares y normas internacionales y nacionales de relevancia para los proyectos relacionados con soluciones tecnológicas susceptibles a aplicarse en entornos prácticos y reales. Para este proyecto se identifica el marco general mostrado en la Figura 25, que incluye las normas legales y técnicas que rigen la temática y el objeto de estudio tratados en el proyecto.

**Figura 25**  
*Marco legal y normativo del proyecto*



**Nota:** Se nombran los ODS, planes, leyes, decretos, resoluciones, documentos y normas técnicas de relevancia para el proyecto.



## Etapa de Diseño

### Diseño Conceptual

Con base a los objetivos planteados para el proyecto, y tomando como referencia la información recopilada en los *Antecedentes* y en el *Marco Conceptual*, se procede con el diseño de la solución tecnológica.

Primero, se esboza la idea que constituirá la base conceptual y el punto de partida del desarrollo tecnológico del proyecto. Esta idea se deriva de unos requerimientos generales planteados los *Objetivos*, por lo que desglosando el objetivo general del proyecto, se tiene que:

El objetivo del proyecto es desarrollar. Por lo tanto la idea no debe estar enfocada hacia un escenario teórico o ideal sino hacia a un escenario práctico y con enfoque aplicado. Se deben prever, en la etapa de diseño, los diferentes limitantes físicos, técnicos y económicos que se pueden presentar en el desarrollo tecnológico.

El objeto de desarrollo del proyecto es un prototipo de un sistema de telegestión basado en el IoT. Así, el alcance se limita a demostrar una tecnología y, por lo tanto, el prototipo será susceptible de diversas mejoras al no ser un producto final. Adicional, existirán diferentes cuestiones técnicas, ejemplo el diseño industrial o el desarrollo de software, que no se trataran detalladamente debido a que no se corresponden con el alcance del proyecto.

La tecnología que se desea demostrar es un sistema de telegestión, la cual se define como la gestión de forma remota de un sistema tecnológico a través de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TICs), sistemas electrónicos y redes de comunicaciones (Fundación-Endesa, 2022), basado en el IoT lo cual genera unas limitaciones técnicas que se deben tener presentes. Adicional, se plantean unos mínimos funcionales para el sistema de telegestión IoT:

- I. Telemetría y procesamiento de las variables físicas que inciden en el consumo eléctrico.
- II. Monitoreo de las variables físicas, del consumo eléctrico y del estado del sistema de telegestión IoT con el fin de automatizar procesos para asegurar una óptima seguridad física e informática y la operación y funcionamiento de los diferentes elementos y componentes del sistema de telegestión IoT.
- III. Supervisión del comportamiento de los diferentes elementos y componentes para verificar el estado del sistema de telegestión IoT.
- IV. Telecontrol de la activación y desactivación del flujo de energía eléctrica hacia los aparatos eléctricos conectados al sistema de telegestión IoT con los objetivos de controlar el consumo eléctrico e implementar acciones automatizadas de protección para los aparatos eléctricos.
- V. Registro, almacenamiento, procesamiento y análisis de la información generada en el sistema de telegestión IoT para que el usuario realice una toma de decisiones asertiva y eficiente en relación con el consumo de los aparatos eléctricos conectados.
- VI. Implementación de una arquitectura de comunicaciones basada en el IoT que incluya la conexión a la red de los objetos físicos a utilizar, las comunicaciones remotas y los servicios de Internet requeridos para acceder al sistema de telegestión IoT desde cualquier ubicación geográfica.

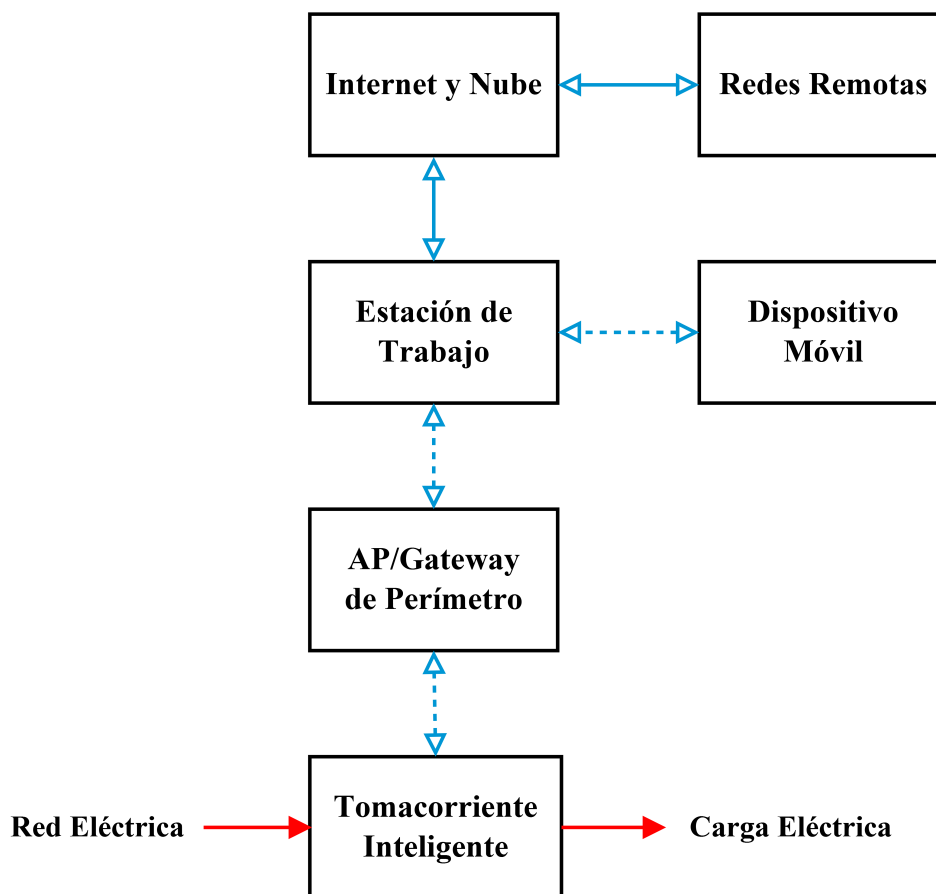
El sistema de telegestión IoT tiene una aplicación explícita hacia los tomacorrientes de 120 a 240 V, 15/20 A en las instalaciones BT-UG. Por lo tanto, el diseño de la solución tecnológica y la elección de los componentes del prototipo se deben elegir para que el sistema de telegestión

IoT pueda trabajar con estos valores nominales de tensión e intensidad de corriente, asegurando también que brinden una conexión óptima y compatible tanto con los tomacorrientes fijos como con los diversos aparatos eléctricos que se pueden encontrar en las instalaciones BT-UG

El contexto espacial donde se ubica el proyecto. La solución tecnológica esta enfocada hacia las instalaciones de BT-UG en Colombia. Por lo tanto, es esencial que el desarrollo del sistema de telegestión, especialmente del elemento que interactuará directamente con las variables eléctricas, se aproxime a los mínimos técnicos y legales presentados en el *Marco Legal y Normativo* para este tipo de componentes, sistemas e instalaciones. Al enfocarse hacia instalaciones BT-UG, y tomando como referencia el marco legal y normativo, se limita los componentes que se podrán usar en el prototipo así como los aparatos eléctricos que podrán conectarse al sistema de telegestión IoT.

Descrito el objetivo general y realizada la identificación de los mínimos funcionales para el sistema de telegestión IoT, se plantea la idea junto con sus elementos abstractos, los cuales se muestran en la Figura 26. Cada elemento ejecutará unas funciones generales, las cuales se describen en la Tabla 10, para la operación sinérgica del sistema de telegestión IoT.

**Figura 26**  
*Diagrama de Elementos*



- Energía Eléctrica
- Comunicaciones
- - - - - Comunicaciones Inalámbricas

**Nota:** Idea para el sistema de telegestión IoT en la cual se muestran los elementos abstractos que lo conforman.

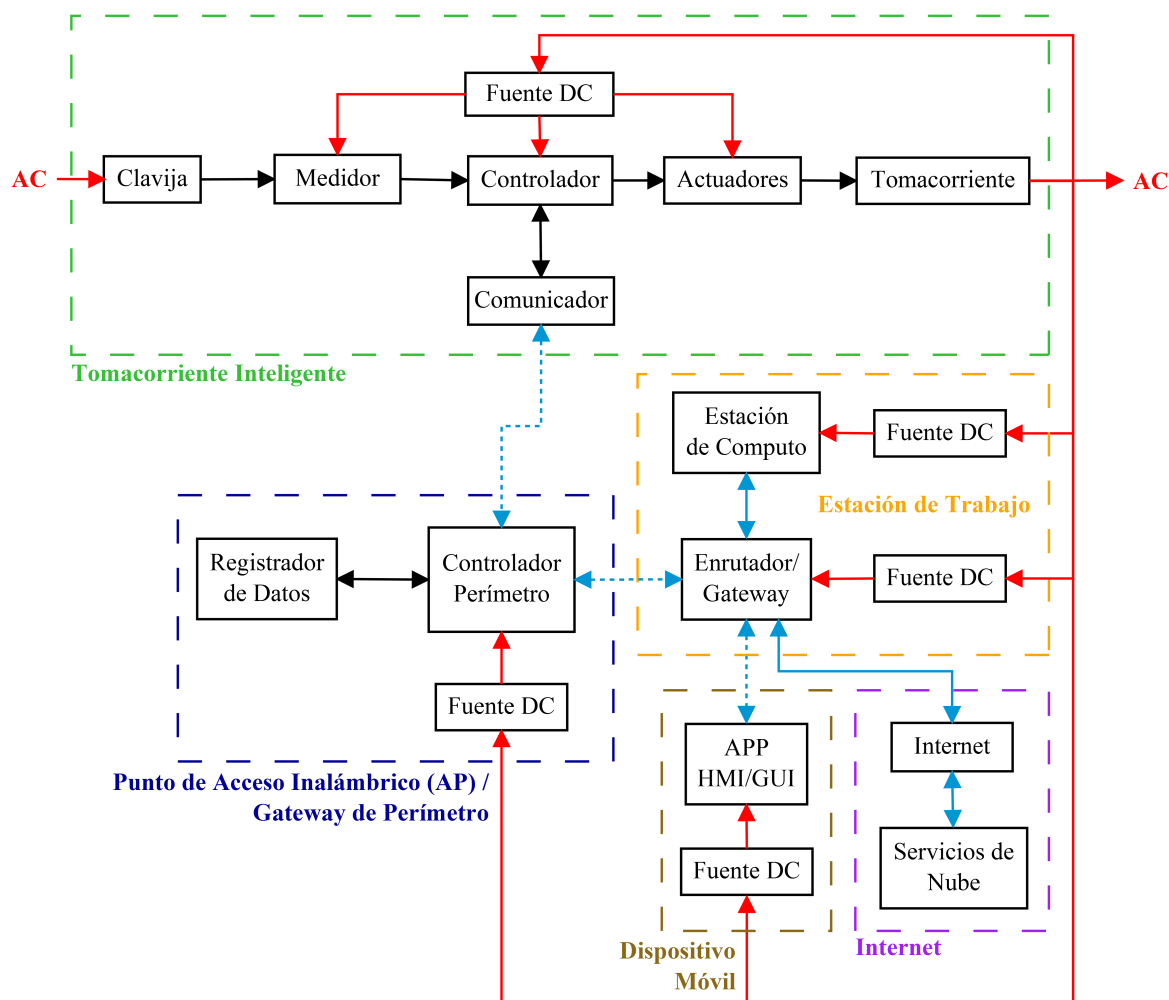
**Tabla 10***Elementos del sistema de telegestión IoT y sus funciones generales*

<b>Elemento</b>	<b>Funciones Generales</b>
Tomacorriente Inteligente	1) Medio físico para la conexión a la red eléctrica de los aparatos o cargas eléctricas. 2) Realizar los procesos de adquisición de datos de las variables eléctricas, la ejecución de las instrucciones de control, y las acciones automatizadas de protección.
Punto de Acceso Inalámbrico (AP) / Gateway de Perímetro	1) Brindar acceso a la red de comunicaciones a los Tomacorrientes Inteligentes. 2) Comunicación y procesamiento de los datos e información del sistema de telegestión IoT.
Estación de trabajo	1) Gestión de los procesos de red y comunicación. 2) Brindar acceso a Internet y a los servicios de Nube. 3) Interacción HMI local con el sistema de telegestión IoT. 4) Tareas de desarrollo y depuración del proyecto.
Dispositivo Móvil	1) Interacción HMI móvil a través de una GUI. 2) Generación de las instrucciones de telecontrol. 3) Visualización de la información del sistema de telegestión IoT.
Internet y Nube	1) Gestión de los protocolos, procesos, servicios y aplicaciones de Internet y de los servicios de Nube. 2) Habilitar el acceso remoto al sistema de telegestión IoT desde cualquier dispositivo y ubicación geográfica (Redes Remotas). 3) Registro, almacenamiento, procesamiento, análisis y visualización remota de la información del sistema de telegestión IoT.

**Nota:** Se detallan los elementos abstractos del sistema de telegestión IoT y las funciones generales que cada uno debe realizar

A partir del planteamiento de la idea, de los elementos y de las funciones generales del sistema de telegestión IoT, se comienza a desglosar y detallar la idea conceptual para aproximarla hacia el ámbito aplicado. En la Figura 27, la cual es una mejora a lo hecho en Alonso-Villegas (2021), se detallan los macrocomponentes que se requieren para que cada elemento pueda cumplir con sus respectivas funciones (Tab. 10).

**Figura 27**  
*Diagrama de Bloques Lógico*



- |  |                   |  |                             |
|--|-------------------|--|-----------------------------|
|  | Energía eléctrica |  | Comunicaciones              |
|  | Información       |  | Comunicaciones Inalámbricas |

**Nota:** Se especifican los macro componentes y el flujo de información requerido para el sistema de telegestión IoT.

Es importante resaltar que en el diseño conceptual simplemente se plantea la idea de lo que se quiere desarrollar, constituyéndose como la base conceptual y el punto de partida del cual se deriva todo el demás diseño y desarrollo. Sin embargo, en este punto, no se tiene en cuenta

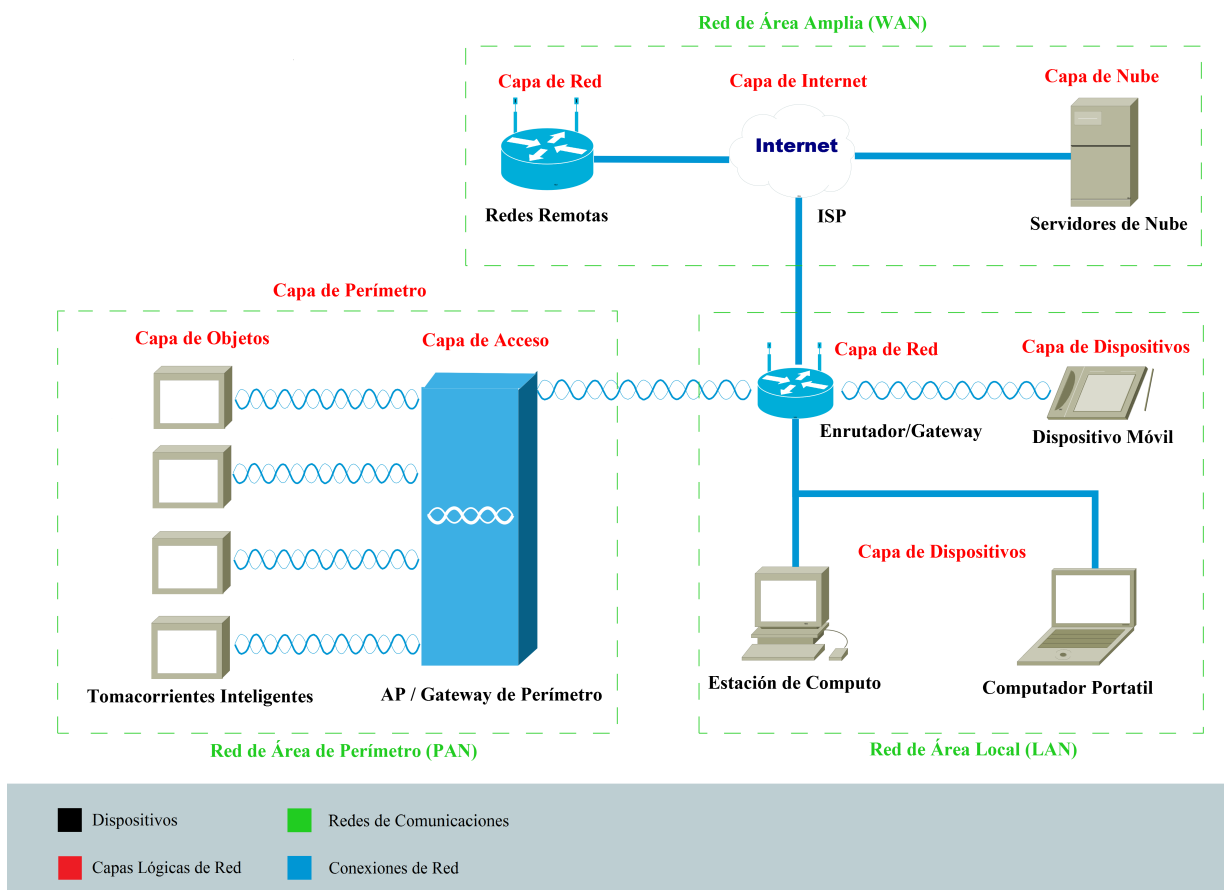
ningún factor derivado del ámbito aplicado, es decir, aún no se especifican los componentes, procesos, algoritmos y requerimientos técnicos para el sistema de telegestión IoT.

### **Red de Comunicaciones IoT**

Al ser un sistema basado en el IoT es importante implementar la red de comunicaciones requerida para la integración de los objetos físicos, el usuario, los datos y la información que se generen, los procesos que se realicen, y las diferentes comunicaciones entre los elementos del sistema de telegestión IoT. A partir de la estandarización IoT mostrada en *Internet de las Cosas* y los resultados obtenidos en Alonso-Villegas (2021), e incluyendo los requerimientos, elementos y funciones planteadas en el diseño conceptual (Fig. 27), se realiza el diseño de la red de comunicaciones para el sistema de telegestión IoT, la cual se muestra en la Figura 28.

El diseño de la Red IoT genera una transición desde la abstracción hacia lo aplicado, empezándose a tener en cuenta diferentes factores prácticos, como el uso de ciertos componentes físicos o de medios y tecnologías de comunicación específicos. El funcionamiento y la operación de la Red IoT se detalla desde tres perspectivas:

**Figura 28**  
*Diagrama de la Red de Comunicaciones IoT*



**Nota:** Diagrama de la red de comunicaciones IoT. Se muestra la arquitectura y topología de la red de comunicaciones basada en el IoT con los dispositivos, capas lógicas, redes, medios y conexiones de red requeridas.

### ***I. Topología Lógica de Red: Capas Lógicas***

Las topología lógica de la red ayuda a comprender la configuración y las relaciones, tanto lógicas como físicas, existentes dentro una red y el flujo de información entre los diferentes elementos y dispositivos que la componen. De lo anterior, la importancia del diseño lógico de la red de comunicaciones para comprender cómo estarán interconectados y relacionados entre sí los diferentes elementos y dispositivos a utilizar, qué medios de comunicación se usaran para enlazarlos y cómo fluirá la información a través de toda la red. Sin embargo, la topología lógica



de la red no siempre se corresponderá con la organización física de sus componentes por lo que posterior a la configuración de las capas lógicas, es esencial especificar la topología física de la red. Para el proyecto, en la Figura 28 se muestran las 7 capas lógicas de la red de comunicaciones IoT a implementar: Objetos, Acceso, Perímetro, Dispositivos de Usuario, Red, Internet y Nube. Una diferencia con respecto a los proyectos y modelos comerciales presentados en los *Antecedentes*, es el escalamiento de red que se propone con la capa de Perímetro.

En los antecedentes y modelos comerciales, los TI se comunican, por lo general, directamente con un WAP, ya sea un módem residencial o un enrutador de red inalámbrico (*router*). Sin embargo, si se deseara implementar una gran cantidad de TI en una misma instalación, y si solo se cuenta con un Punto de Acceso Inalámbrico (*Wireless Access Point - WAP*), se puede generar una saturación del canal inalámbrico y ancho de banda (dependiendo esto de las prestaciones del WAP) lo que puede derivar en interferencias o perjuicios en las comunicaciones de los diferentes dispositivos enlazados al WAP. Teniendo en cuenta que instalaciones BT-UG como las empresariales o comerciales pueden llegar a tener decenas o cientos de dispositivos enlazados inalámbricamente a un solo WAP, es fundamental evitar una saturación adicional, por parte del sistema de telegestión IoT, al canal inalámbrico y al WAP. Por lo tanto, para mitigar dicha situación, se propone escalar la red de comunicaciones e implementar un WAP dedicado exclusivamente a los TI del sistema de telegestión IoT, nombrado en el proyecto como AP/Gateway de Perímetro. En el Anexo 3 se muestra un ejemplo de la anterior situación y como el AP/Gateway de Perímetro soluciona las falencias identificadas.

## ***II. Topología Física de Red: Dispositivos y Conexiones***

La topología física se usa para especificar los dispositivos físicos, los medios de comunicación y las conexiones requeridas para la implementación de la red de comunicaciones. También esta topología ayuda en la ubicación y distribución de los dispositivos y su interconexión. Dependiendo de su función, a cada capa lógica se le asignan unos dispositivos físicos. Entre tanto, la elección de los los medios de comunicación y las conexiones de red dependerán principalmente de la ubicación espacial y geográfica, y la distribución de los dispositivos en dicha ubicación. Para el sistema de telegestión IoT, se requieren, según su capa lógica, los dispositivos físicos que se muestran en la Figura 28 y los cuales se especifican en la Tabla 11.

Conocida la topología lógica de la red y los dispositivos físicos requeridos, se realiza la elección de los medios de comunicaciones y las respectivas conexiones entre dispositivos. Como se evidencia en la Figura 28, se utilizaran medios cableados e inalámbrico, estableciendo las conexiones de red como se especifica a continuación:

**Conexión inalámbrica entre TI y el AP/Gateway de Perímetro:** Con este tipo de conexión se podrán implementar TI en diferentes ubicaciones y sin realizar modificaciones sobre la infraestructura de la instalación, inclusive habilitando la implementación de los TI en lugares de difícil acceso o donde no existe infraestructura de red. Se requerirá únicamente que los TI estén dentro del alcance de la comunicación inalámbrica con el AP/Gateway de Perímetro.

**Conexión inalámbrica entre el AP/Gateway de Perímetro y el Enrutador de red:** Al igual que con los TI, con este tipo de conexión se evita modificaciones a la infraestructura de la instalación. A su vez, permite ampliar el rango del alcance de las comunicaciones de la red,

habilitando la implementación en lugares donde no existe infraestructura de red. Como requerimiento, se debe procurar que el protocolo o canal inalámbrico usado en esta conexión sea diferente al usado en la conexión anterior para mitigar el riesgo de interferencias.

**Conexión inalámbrica entre el Dispositivo móvil y el Enrutador de red:** Con esta conexión se asegura la portabilidad de la supervisión del sistema de telegestión IoT. El usuario, a través de un dispositivo móvil que podrá llevar consigo, podrá desplazarse y supervisar el sistema de telegestión IoT sin depender de infraestructura adicional o equipos fijos.

**Conexión cableada entre los Dispositivos de usuario y el Enrutador de red:** Este tipo de conexión es estándar en las redes de comunicaciones, y por lo general las infraestructuras de red ya las traen implementadas, por lo que no se requerirá un mayor trabajo más del que asegurar que la conexión entre los dispositivos de usuario y el enrutador de red sea óptima.

**Conexión cableada a Internet:** Cada ISP implementa diferentes medios cableados para el acceso a Internet como el cableado de cobre o la fibra óptica, por lo que ya dependerá del usuario que ISP escoger según sus necesidades. El requisito para este tipo de conexión es que se pueda asegurar un ancho de banda y velocidad de transmisión adecuado según el tipo de instalación donde se implementará el sistema de telegestión IoT.

**Tabla 11**  
*Dispositivos Físicos de la Red de Comunicaciones IoT*

Capa Lógica	Dispositivo Físico	Función de Red
Objetos	Tomacorriente Inteligente	Interacción con la red, los aparatos y las variables eléctricas
Acceso	AP/Gateway de Perímetro	Gestión de los Tomacorrientes Inteligentes y acceso a la WLAN
Perímetro	Tomacorrientes Inteligentes y AP/Gateway de Perímetro	Perímetro de la Red
Dispositivos de Usuario	Equipos de Computo y Dispositivos Móviles	Interacción HMI a través de GUI
Red	Dispositivos de Red ( <i>Switch, Router, Modem, WAP, etc.</i> )	Gestión de redes LAN y WLAN, y acceso a la WAN
Internet	Prestador de Servicio de Internet (ISP) y su infraestructura	Interconexión y acceso a Internet
Nube	Servicios, Programas, Aplicaciones e Infraestructura de Nube	Plataforma IoT y servicios de Nube para la gestión de la información desde cualquier ubicación geográfica

**Nota:** Se detallan los dispositivos físicos requeridos, y sus funciones de red, para la red de comunicaciones IoT según cada elemento del sistema de telegestión

Con lo anterior, se consolida la topología de red del sistema de telegestión IoT, en la cual el enlazamiento de comunicaciones entre las diferentes capas lógicas, dispositivos físicos y conexiones se concreta a través de una configuración mixta Estrella-Árbol, en la cual los nodos centrales o troncales son el AP/Gateway de Perímetro (para red PAN), el enrutador de red (para red LAN) y el ISP (para red WAN), siendo los Tomacorrientes Inteligentes el origen de la

información, los Servidores de Nube el destino central y los Dispositivos de Usuario el destino final.

Finalmente, con las topologías lógica y física de la red establecidas, se empieza la materialización de la idea planteada en el Diseño Conceptual al empezar a dirigir el diseño hacia el ámbito aplicado, teniendo en cuenta diferentes requerimientos y limitantes físicos, por ejemplo, los dispositivos requeridos para que el usuario pueda interactuar con el sistema de telegestión IoT o la infraestructura de red que se puede encontrar en las instalaciones BT-UG.

### ***III. Redes de Comunicaciones***

La arquitectura de red es la cual especifica totalmente la configuración, tanto lógica como física, de una red de comunicaciones. En la arquitectura se agrupan las capas lógicas, dispositivos físicos y conexiones de red en diferentes redes de comunicaciones, la cuales se especifican principalmente según su alcance físico o geográfico (Tomasi, 2003).

Para el sistema de telegestión IoT se consideran tres grandes redes de comunicaciones, las cuales se muestran en la Figura 28 y se especifican en la Tabla 12. Así, se puede establecer que la arquitectura de red para el sistema de telegestión IoT estará basada en una configuración cliente-servidor (CISCO-Networking-Academy, 2019; Compton y col., 2015; Tomasi, 2003), donde los clientes serán los Objetos y Dispositivos de usuario, los cuales requerirán y enviarán información hacia los servidores de las plataformas de Nube, en los cuales se almacenará y centralizará la información del sistema de telegestión IoT.

Finalmente, con las capas lógicas, los dispositivos físicos, las conexiones y las redes de comunicaciones establecidas, se configura la arquitectura de red a implementar para el sistema de telegestión IoT junto con los roles y funciones que cumplirán cada uno de los elementos y

componentes del sistema de telegestión IoT.

**Tabla 12**

*Redes de Área de comunicaciones del sistema de telegestión IoT*

<b>Red de Área</b>	<b>Capas Lógicas</b>	<b>Descripción</b>
Perímetro (EAN)	Objetos, Acceso, Perímetro	Red externa en la cual interactúan los objetos, se origina los datos y la información y se brinda el acceso a la red de comunicaciones a los objetos.
Local (LAN)	Dispositivos de Usuario, Red	Red en la cual se da la interacción del Usuario con el sistema de telegestión IoT y se brinda el acceso a la WAN
Amplia (WAN)	Internet, Nube, Redes remotas	Red en la cual se brinda el acceso a Internet para la centralización de la gestión de la información y su acceso desde cualquier ubicación geográfica

**Nota:** Se detallan las redes de área de comunicaciones configuradas en el sistema de telegestión IoT

### **Diseño Funcional**

El diseño funcional agrupa y consolida la idea planteada, el diseño conceptual y el diseño de la red de comunicaciones hacia un enfoque aplicado, es decir, traslada la idea del plano abstracto hacia el plano físico en el cual ya se establecen los componentes físicos requeridos para cada elemento, y los procesos y funciones que realizarán para hacer posible las funciones generales planteadas para el sistema de telegestión IoT. En la Figura 29 se muestra el diagrama del diseño funcional del Tomacorriente Inteligente el cuál realizará específicamente las funciones de:

- Medio físico para la conexión a la red eléctrica de los aparatos o cargas eléctricas que se conecten al sistema de telegestión IoT.
- Adquisición y procesamiento de las variables físicas que inciden en el consumo eléctrico

(Intensidad de corriente, Tensión, Potencia eléctrica, Consumo eléctrico acumulado, Temperatura)

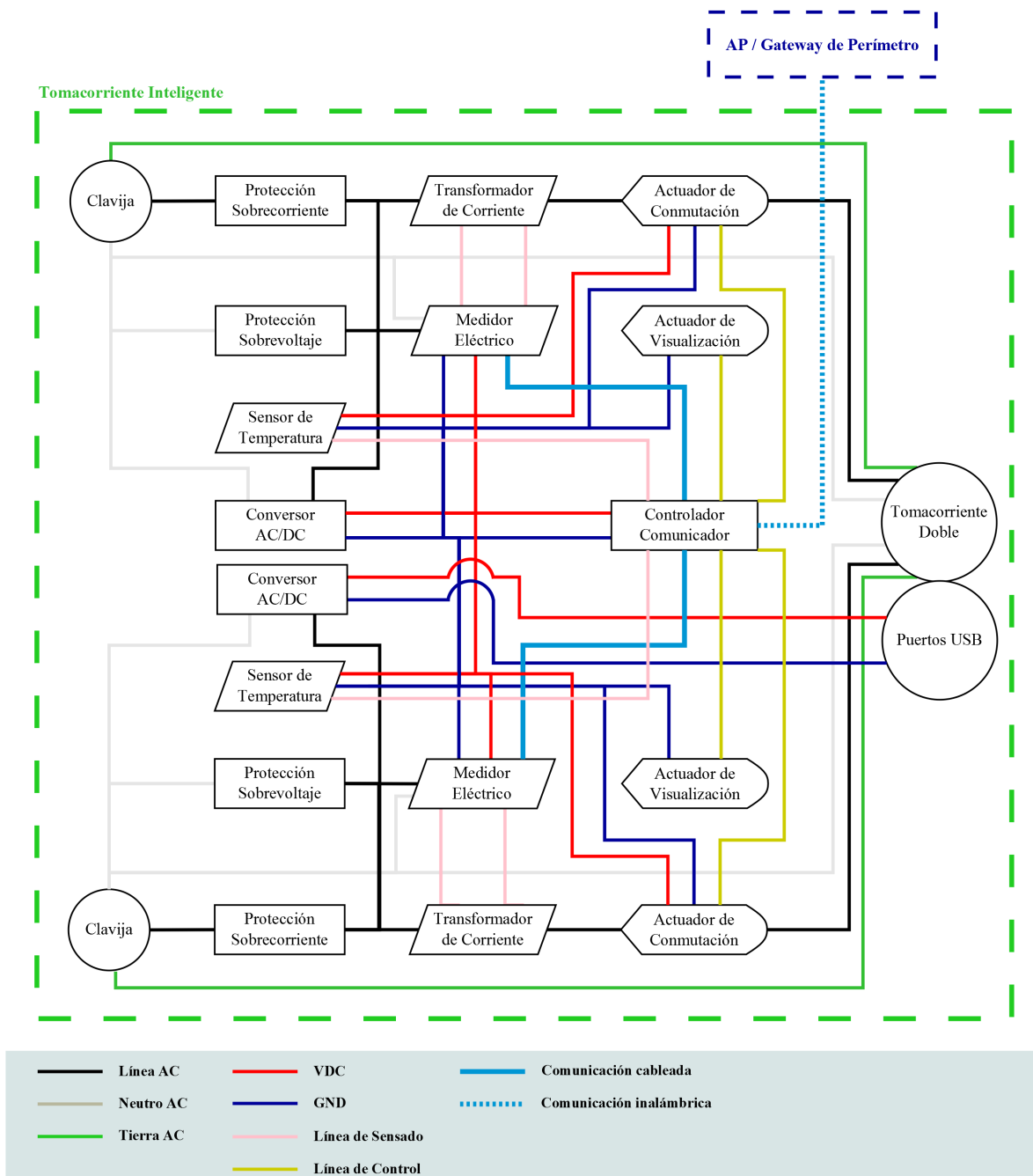
- Monitoreo de las variables físicas, del consumo eléctrico y del estado del Tomacorriente Inteligente para ejecutar acciones automatizadas para el aseguramiento de la integridad física, la operación y el funcionamiento de los componentes del Tomacorriente Inteligente.
- Ejecución de las instrucciones de telecontrol para la activación y desactivación del flujo de energía eléctrica hacia los aparatos eléctricos conectados al sistema de telegestión con los objetivos de controlar el consumo de los aparatos eléctricos e implementar acciones automatizadas de protección contra variaciones por fuera de los límites establecidos de las variables eléctricas.
- Comunicación de los datos procesados de las variables eléctricas y del estado del Tomacorriente Inteligente hacia el AP/Gateway de Perímetro.

Para realizar las anteriores funciones, se requerirán los siguientes componentes físicos:

- I. **Clavija:** Conexión a la red eléctrica
- II. **Tomacorriente:** Conexión de los aparatos eléctricos
- III. **Medidor Eléctrico:** Medición y calculo de las variables eléctricas de tensión, intensidad de corriente, potencia eléctrica, y consumo eléctrico acumulado
- IV. **Actuador de Conmutación:** Activación y desactivación del flujo de la energía eléctrica hacia los aparatos eléctricos

- V. **Actuador de Visualización:** Visualización cualitativa del estado del Tomacorriente Inteligentes
- VI. **Componentes de Protección:** Protección automatizada contra las variaciones por fuera de los valores nominales de las variables eléctricas
- VII. **Controlador Electrónico:** Adquisición y procesamiento de los datos del medidor, instrucciones de control para los actuadores,,encapsulamiento de la información para enviarse y comunicación inalámbrica con el AP/Gateway de Perímetro
- VIII. **Convertor AC/DC:** Convertir la corriente AC a corriente DC para suministrar la energía eléctrica a los diferentes componentes electrónicos.
- IX. **Cableado:** Conexiones eléctricas y electrónicas entre los diferentes componentes.
- X. **Misceláneos:** Interruptor de encendido, PCB, estructura (caja), tornillería y demás componentes requeridos para el montaje del Tomacorriente Inteligente.



**Figura 29***Diagrama de Bloques Funcional del Tomacorriente Inteligente*

**Nota:** Se muestra los componentes físicos y conexiones eléctricas, electrónicas y de comunicaciones requeridas para la operación del Tomacorriente Inteligente.

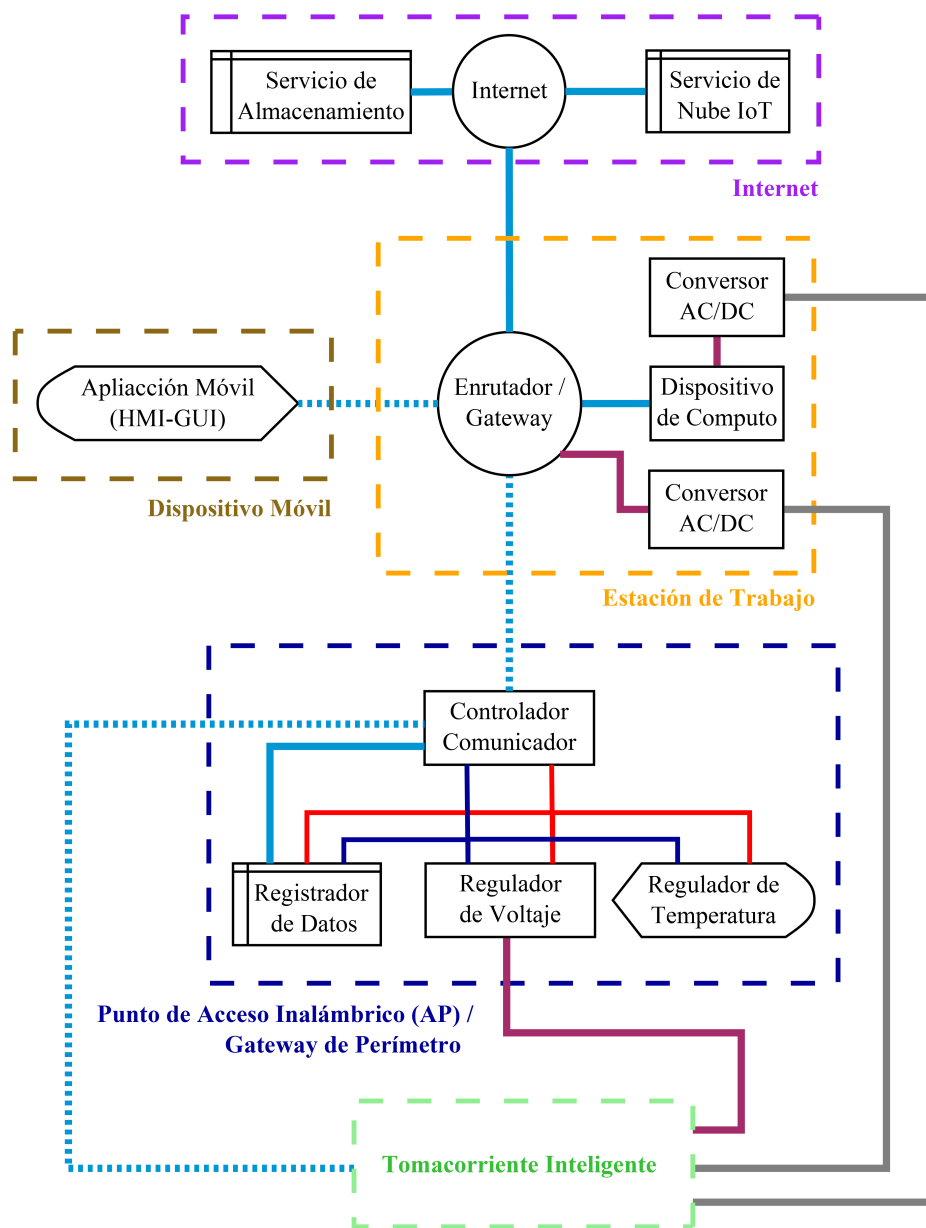
En cuanto a los otros elementos del sistema de telegestión IoT, en la Figura 30 se especifican los componentes físicos requeridos cuyas funciones específicas son:










- I. **Controlador Electrónico del AP/Gateway de Perímetro:** Procesamiento de la información enviada por los Tomacorrientes Inteligentes, gestión de las comunicaciones inalámbricas de la Red de Área de Perímetro y enlace de comunicación con el enrutador de red para comunicarse con los servicios de Internet y de Nube.
- II. **Registrador de Datos:** Almacenamiento no volátil en el AP/Gateway de Perímetro de la información enviada por los Tomacorrientes Inteligentes en caso de que se pierda la conexión con Internet.
- III. **Regulador de Temperatura para el AP/Gateway de Perímetro:** Regulación de la temperatura de la caja y del controlador comunicador.
- IV. **Equipo de Computo:** Interacción HMI con el sistema de telegestión IoT, acceso a los servicios y aplicaciones de Internet y de Nube, y tareas de desarrollo y depuración.
- V. **Enrutador de Red:** Gestión de los protocolos y procesos de red y comunicaciones, gestión de las redes LAN y WLAN, y puerta de enlace y acceso (Gateway) a Internet.
- VI. **Dispositivo Móvil:** Interacción HMI móvil con el sistema de telegestión IoT, y acceso móvil a los servicios y aplicaciones de Internet y de Nube.
- VII. **Aplicación Móvil:** Interacción del usuario con el sistema de telegestión IoT a través de la GUI, generación de las instrucciones de telecontrol de los actuadores de conmutación, y visualización móvil de la información del sistema de telegestión.

- VIII. **Prestador de Servicios de Internet (ISP):** Habilitar el acceso físico y cibernético a Internet y a sus protocolos, procesos, servicios y aplicaciones.
- IX. **Servicio de Nube IoT:** Interacción del usuario con el sistema de telegestión IoT a través de la GUI; centralización de la información en servidores de la plataforma; registro, procesamiento, análisis y visualización remota de la información del sistema de telegestión IoT; y automatización de los procesos informáticos relacionados.
- X. **Almacenamiento de archivos en Nube:** Almacenamiento no volátil de los archivos de registro, procesamiento y análisis de la información del sistema de telegestión IoT para su acceso desde cualquier dispositivo y ubicación geográfica desde que se cuente con acceso a Internet y al servicio de Nube.
- XI. **Adaptadores AC/DC y Fuentes DC:** Suministrar la energía eléctrica a los diferentes equipos y componentes.
- XII. **Cableado:** Conexiones eléctricas, electrónicas y de comunicaciones entre los diferentes componentes.
- XIII. **Componentes Misceláneos:** Estructura (caja), tornillería, y demás componentes requeridos para el montaje de los componentes.

**Figura 30**

*Diagrama de Bloques Funcional del sistema de telegestión IoT*



 Línea AC	 Cable DC	 Comunicación cableada
 Neutro AC	 VDC	 Comunicación inalámbrica
 Tierra AC	 GND	
 Cable AC		

**Nota:** Se muestra los componentes y conexiones físicas requeridas para la operación de todo el sistema de telegestión IoT.

## Interfaces Gráficas de Usuario - GUI

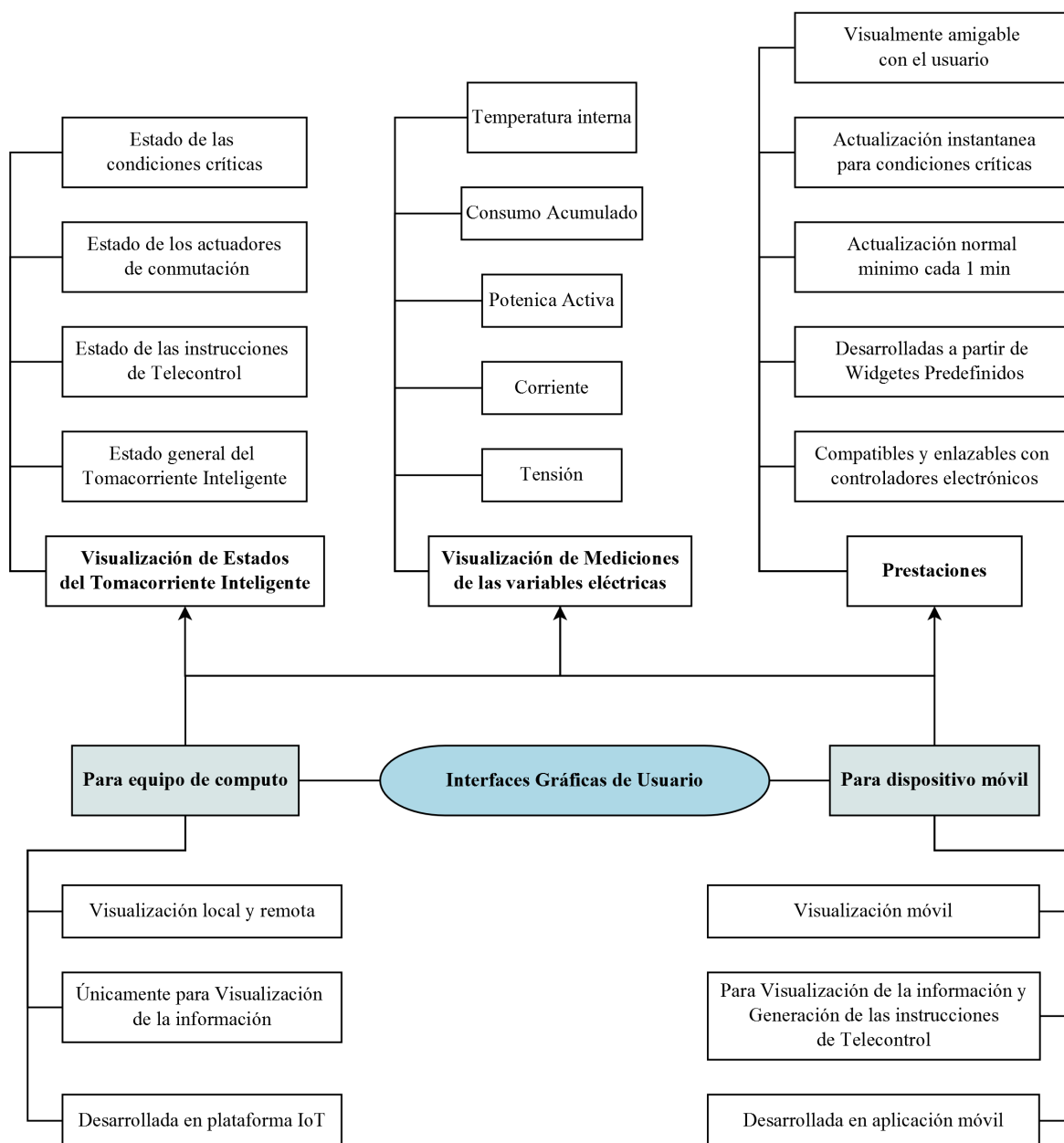
Las GUI son un medio de Interacción Humano-Maquina (HMI) usados para que el usuario pueda interactuar con los sistemas tecnológicos de forma sencilla. Por lo tanto, se propone, para la interacción entre el usuario y el sistema de telegestión IoT, la implementación de dos (2) GUI a partir de lo especificado en la Figura 31.

## Archivos de Información

Los archivos de información son el medio por el cual la información se gestiona, es decir, se registran los datos obtenidos de los controladores electrónicos, se almacenan de forma no volátil para su posterior uso, se procesan para obtener información usable, y se analizan para conocer el estado y comportamiento del sistema de telegestión IoT y poder así tomar decisiones con base a esa información. Para el prototipo a desarrollar, como en general para el sistema de telegestión IoT, se propone implementar los siguientes archivos de información:

- I. **Registro de Datos:** Registro histórico y almacenamiento no volátil de los datos enviados cada periodo de tiempo por el AP/Gateway de Perímetro.
- II. **Procesamiento de Información:** Procesamiento de los datos almacenados para obtener la información del estado del Tomacorriente Inteligente y de los valores de las variables eléctricas a través del tiempo.
- III. **Análisis de información:** Análisis estadísticos de la información procesada.
- IV. **Archivos para validación experimental:** Para el prototipo, archivos para el registro de las mediciones y datos requeridos para la validación experimental, para el análisis estadístico de los resultados obtenidos, para el diseño de los modelos matemáticos, entre otros.

**Figura 31**  
*Requerimientos generales para las GUI*



**Nota:** En la parte superior, los requerimientos comunes para ambas GUI. En la parte inferior, los requerimientos específicos.

## **Requerimientos Técnicos**

Finalmente, la etapa de diseño del sistema de telegestión IoT se concluye con la consolidación de los requerimientos técnicos, los cuales se detallan en el Anexo 4 y resumen los anteriores diseños, brindando una información detallada de lo que se requiere específicamente para el desarrollo del prototipo del sistema de telegestión IoT.

## **Etapa de Desarrollo**

A partir de los resultados obtenidos en la etapa de diseño se realiza la búsqueda y selección de los modelos comerciales que cumplan con los requerimientos técnicos (Anexo 4). Es importante aclarar que el desarrollo del prototipo del Tomacorriente Inteligente del sistema de telegestión IoT se enfocará, para este proyecto, hacia la red eléctrica de 120 V 15 A por lo que los modelos comerciales de los componentes a implementar se seleccionaran bajo este enfoque. Sin embargo, también se desarrollará el Tomacorriente Inteligente bajo la premisa de que su diseño estructural sea fácilmente adaptable (simplemente cambiando algunos modelos de los componentes) para trabajar con otros valores nominales de tensión y corriente que se pueden encontrar en las instalaciones BT-UG.

### ***Clavija y Tomacorriente***

En Colombia, para las redes no trifásicas de 120 a 240 V 15/20 A se sigue el estándar estadounidense provisto por la NEMA para las clavijas y los tomacorrientes. Por lo tanto, para cumplir con los requerimientos técnicos, se seleccionan las clavijas y tomacorriente NEMA 5-15/20 para redes de 120 V 15/20 A, NEMA 6-15/20 para redes de 240 V 15/20 A, y NEMA 14-20 para redes entre 120 a 240 V 20 A; y sus versiones de seguridad (NEMA L). Para el

desarrollo del prototipo del Tomacorriente Inteligente, se usan dos (2) clavijas y un (1) tomacorriente doble tipo NEMA 5-15

### ***Medidor eléctrico***

Existen diferentes componentes y modelos comerciales para la medición de las variables eléctricas. No obstante, a partir de los resultados de la revisión de los Antecedentes, y como mejora del proyecto realizado previamente en (Alonso-Villegas, 2021), se selecciona el modulo PZEM-004T-100A como medidor eléctrico del Tomacorriente Inteligente. Este modulo ofrece diversas ventajas sobre los otros modelos existentes, incluyendo sobre los módulos ACS-712 y ZMTP-101B, para la medición de la corriente y la tensión y el calculo de las otras variables eléctricas (PZEM, s.f.; Vango, 2016):

En una sola tarjeta electrónica, trae integrado todos los componentes requeridos para la adquisición, acondicionamiento, procesamiento y presentación de la información de las variables eléctricas de intensidad de corriente, tensión, potencia eléctrica activa, energía eléctrica, factor de potencia y frecuencia. Esto ofrece una ventaja sobre otros modelos existentes debido a que no se requiere la implementación por aparte de los diferentes componentes requeridos para la medición y calculo de las variables eléctricas.

La adquisición de la señal de corriente se realiza a través del método del TCNI mientras que la señal de tensión se realiza a través del método del divisor resistivo de tensión. Ambas señales se amplifican, se filtran y se acondiciona para su procesamiento.

El componente principal del módulo es el medidor SoC V9881D el cual se encarga de realizar todo el procesamiento de las señales eléctricas, de los cálculos de las otras variables, de la información en general y de las comunicaciones.



El SoC V9881D encapsula la información para comunicarla mediante una interfaz optocoplada UART a RS485 bajo el protocolo Modbus-RTU. Esto permite comunicar el PZEM-004T con otros microcontroladores, tarjetas de desarrollo o equipos de computo para la visualización y presentación de la información.

Aunque su mayor costo y tamaño frente a otros modelos podrían ser una desventaja, al ser un modulo integrado y de alta precisión, hacen del PZEM-004T en un módulo más eficiente y óptimo para implementarse como medidor eléctrico en diferentes aplicaciones incluyendo la relacionada con el proyecto. Adicional, su valor operacional y prestaciones técnicas se aumentan y la inversión que representa se hace viable y óptima debido a que el SoC V9881D cumple con diferentes estándares de la IEC (62053-21, 62053-22 y 62053-23), ofreciendo una alta exactitud y bajo error de aproximación de las mediciones.

### ***Actuador de conmutación***

Con base a los niveles de corriente y de tensión que se deben manejar en el Tomacorriente Inteligente, así mismo se debe seleccionar un actuador de conmutación que pueda trabajar con dichos niveles. Aunque existen diferentes métodos para la conmutación ON/OFF de señales eléctricas (relés electromecánicos, relés de estado solido, transistores de potencia, tiristores, etc.) se elige, según las posibles aplicaciones del proyecto, los relés electromecánicos.

Es importante notar que las señales DC se trabajarán a 5 V mientras que las señales de control se trabajaran 3.3 V V por lo que la alimentación de los relés debe ser a 5 V mientras que la del circuito de control a 3.3 V.

Así, se seleccionan dos modelos comerciales los cuales son óptimos para trabajar tanto con los niveles de corriente y tensión que se pueden encontrar en las instalaciones BT-UG como

con los niveles de las señales DC y de control establecidos anteriormente. Para redes eléctricas de 120 V 15 A o 240 V 10 A se selecciona el rele JQC-3FF-S-Z, mientras que para redes de 120/240 V 20 A se selecciona el relé SLA-04VDC-SL-A.

Para el prototipo del Tomacorriente Inteligente, se selecciona un modulo optocoplado de 2 canales con reles JQC-3FF-S-Z para controlar independientemente cada conexión eléctrica del tomacorriente doble. Adicional, los módulos optocoplados traen incorporados un circuito de aislamiento entre la alimentación y la señal de control del relé, brindando una seguridad eléctrica para el controlador electrónico y que permite alimentar al relé con un nivel determinado de tensión (5 V) pero controlarlo con una señal de menor nivel (3.3 V)

### ***Actuador de visualización***

Para la visualización *in situ* del estado del Tomacorriente Inteligente se elige usar LED Bicolor RG (Rojo, Verde) con los cuales se pueden obtener principalmente 3 colores: Rojo, Verde y Amarillo. Sin embargo, al controlarse con señales PWM, se puede variar el brillo de los semiconductores del LED para obtener otros colores como el Naranja. Así, cada color representara cualitativamente un estado de la respectiva sección (izquierda o derecha) del Tomacorriente Inteligente:

- **LED apagado:** No hay energización del Tomacorriente Inteligente
- **LED Verde:** Variables eléctricas en rangos normales, Relé encendido, y aparato eléctrico conectado y operando (consumo eléctrico normal)
- **LED Naranja:** Variables eléctricas en rangos normales, Relé encendido, pero aparato eléctrico desconectado o conectado pero no operando (consumo eléctrico fantasma)

- **LED Amarillo:** Variables eléctricas en rangos normales, Relé apagado.
- **LED Rojo:** Variables eléctricas por fuera de los límites establecidos (Condiciones críticas de funcionamiento)

### *Componentes de protección*

Siguiendo lo establecido en las normas técnicas y legales, se incluyen los siguientes componentes y acciones automatizadas de protección:

- Componente de protección contra cortos circuitos
- Componente de protección contra picos de tensión
- Componente de sensado de sobretemperatura
- Protección automatizada contra sobretensión del 25 % del valor eficaz nominal
- Protección automatizada contra baja tensión del 10 % del valor eficaz nominal
- Protección automatizada contra sobrecorrientes superiores al valor eficaz nominal
- Protección automatizada contra sobrecarga del 10 % del valor eficaz nominal
- Alerta contra sobreconsumo (consumo excesivo)
- Alerta contra circuitos abiertos (consumo fantasma)
- Puesta a Tierra

Los modelos comerciales elegidos para los componentes de protección del prototipo se eligen con base a los valores nominales esperados de las variables eléctricas y de temperatura:

- I. **Componente de protección contra cortos circuitos:** Fusible corto de vidrio 5x20mm para 250 V 15 A
- II. **Componente de protección contra picos de tensión:** Varistor MOV 20D271K
- III. **Componente de sensado de sobretemperatura:** Sensor LM35. Se programa al controlador para generar una alerta cuando se sobrepase el umbral establecido de temperatura (50 °C).
- IV. **Protecciones automatizadas:** En el controlador se establecen unos rangos de trabajo para las variables eléctricas. A partir de los datos entregados por el medidor eléctrico, el controlador verifica que los valores se encuentren dentro de los rangos establecidos. Caso contrario, se realiza la acción automatizada de protección:
  - a. Desactivar el actuador de conmutación para desenergizar el aparato eléctrico
  - b. Visualizar el estado de condición crítica a través del actuador de visualización
  - c. Enviar la alerta al AP/Gateway de Perímetro para visualizarse en las GUI de la plataforma IoT y la aplicación móvil, y para registrarse en el archivo de registro de datos de la Nube
- V. **Alertas contra sobreconsumo y circuito abierto:** Aunque no son condiciones críticas de funcionamiento, el Tomacorriente Inteligente generará una alerta cuando se sobrepase el umbral establecido para el consumo eléctrico. Igualmente, cuando el aparato eléctrico este conectado pero no operando, lo cual puede generar un consumo fantasma, se generará la respectiva alerta. Estas alertas le permiten al usuario tomar acciones preventivas y correctivas para evitar tanto el consumo excesivo como el consumo fantasma.

VI. **Tierra:** Las clavijas y el tomacorriente cuentan con su respectivo conductor de tierra por lo que cualquier falla a Tierra, el Tomacorriente Inteligente no se vera afectado.

### *Controladores electrónicos*

Existen diferentes controladores y módulos electrónicos en el mercado que cumplen con los requerimientos y especificaciones técnicas para los controladores electrónicos. Por lo tanto, se elige trabajar con tarjetas de desarrollo basadas en el modulo ESP32 principalmente debido a que (Espressif, 2022):

Integra un modulo WiFi en el mismo chip del controlador, por lo que no se requiere un componente comunicador por separado del controlador electrónico.

Su procesador es doble núcleo, permitiéndole trabajar en simultaneo como Punto de Acceso (AP) como estación WiFi (STA), esencial para el funcionamiento del AP/Gateway de Perímetro. Así, la comunicación entre el Tomacorriente Inteligente y el AP/Gateway de Perímetro, y entre este ultimo con Internet y los Servicios de Nube, se realiza a través de WiFi con el protocolo HTTP.

Altas prestaciones en cuanto a arquitectura del procesador (32 bits), velocidad de operación (80 MHz), memoria FLASH (4 MB), cantidad de puertos (32 a 36 puertos), y contar con las interfaces requeridas para comunicarse con los otros componentes (ADC, GPIO, PWM, UART, SPI)

Funciona a 3.3 V pero su alimentación puede ser a 5 V.

Compatible con la IDE, la aplicación móvil y los Servicios de Nube elegidos para el proyecto.

Para el Tomacorriente Inteligente, por su tamaño mas compacto frente a otras tarjetas

basadas en la ESP32, se elige la tarjeta WeMos Mini D1 ESP32. Entre tanto, para el AP/Gateway de Perímetro, se elige principalmente por su precio y tamaño, la tarjeta ESP32-WROOM-32D

### ***Registrador de datos***

El componente físico mas adecuado para fungir como registrador no volátil de datos son las memorias microSD. Por lo tanto, se escoge un modelo comercial tipo *Holder* para MicroSD que sea compatible con el controlador electrónico escogido para el AP/Gateway de Perímetro. Así, el modelo escogido se comunica mediante la interfaz SPI la cual habilita al controlador para realizar diferentes procedimientos informáticos sobre la MicroSD. Para el proyecto, se utilizará el modulo MicroSD para crear un archivo de texto (.txt) en el cual se registraran, cuando se pierda la comunicación entre el AP/Gateway de Perímetro e Internet, las tramas de datos con la información encapsulada y codificada (llamada en el proyecto *Codified Serial Message (CSM)* - Mensaje Serial Codificado) que llegan de los Tomacorrientes Inteligentes. Por cada uno, existirá un archivo de texto con los respectivos CSM por lo que cada cierto periodo de tiempo se extraerá la MicroSD para verificar si existen CSM almacenados y agregar los datos de estos al registro histórico. Así, se minimiza la perdida de información.

### ***Equipo de Computo***

La selección del equipo de computo varia según las necesidades del usuario del sistema de telegestión IoT. No obstante, en este proyecto se busca que el equipo de computo permita actividades de desarrollo y depuración del proyecto, y las funciones dedicadas de supervisión del sistema de telegestión IoT, es decir, que cuente con acceso a Internet y a un navegador web para el acceso a los servicios de Nube. En cuanto al software usado, se tiene:

- **IDE:** Se eligió la IDE Arduino gracias a su facilidad de uso, compatibilidad con los controladores electrónicos elegidos, y programación de estos via USB
- **Depuración Serial:** La IDE Arduino tiene integrado un monitor serial por lo que a través de los puertos USB y las interfaces seriales de los controladores se pueden realizar procesos de depuración de la programación, funcionamiento y operación del sistema de telegestión.
- **Navegador Web:** Se eligió Google Chrome debido a ser un navegador robusto y de amplio uso. Adicional que parte de los servicios de Nube también serán de Google por lo que con una sola cuenta de usuario de Google, se pueden acceder a todos estos servicios.
- **Aplicación de Nube de escritorio:** Se cuenta con el aplicativo para escritorio de Google Drive para la compatibilidad con este servicio de almacenamiento de archivos en Nube.

### ***Enrutador de Red***

El enrutador de red es un componente esencial en el sistema de telegestión IoT debido a las funciones que realiza. Se cuenta con el ISP ETB el cual proveyó con un dispositivo tipo módem modelo ZTE ZXHN F660E cuyas prestaciones de ancho de banda Gigabit, velocidad de transmisión contratada de 60 Mbps y gestión LAN/WLAN son adecuadas para el proyecto.

### ***Fuentes DC***

Los componentes y equipos electrónicos requieren una alimentación DC por lo que se debe implementar los respectivos componentes que provean dicha alimentación. Así, se tienen diferentes niveles de operación de tensión DC que se deben suplir: 3.3 y 5 V para los componentes electrónicos y el Dispositivo móvil, 12 V para el Enrutador de red, y 3.3, 5 y 12 V para el Equipo de computo.

Con base a los componentes escogidos anteriormente, se eligen los modelos de las fuentes DC: un conversor de 120 VAC a 5 VDC 0.6 A 3 W para los componentes electrónicos de 5 V y un conversor AMS1117-3.3V para los componentes de 3.3 V del Tomacorriente Inteligente; alimentación 5 V por USB para el AP/Gateway de Perímetro; un adaptador de 120 VAC a 12 VDC 1.5 A para el Enrutador de red; las respectivas fuentes de potencia para el Equipo de computo; y un cable USB o cargador de 5 V 2 A para mantener energizado el Dispositivo móvil.

### ***Cableado y Conexiones***

Existen tres categorías de conexiones en el sistema de telegestión IoT: Eléctricas, Electrónicas y de Comunicaciones:

**I. Conexiones eléctricas:** las requeridas para la distribución de la energía eléctrica a los diferentes componentes y equipos. Para estas conexiones, se usan las pistas PCB para la distribución de la energía eléctrica en la tarjeta del Tomacorriente Inteligente. Para interconectar los demás componentes, se usan cables AWG 14 para las conexiones AC y XH-2.54 para las conexiones DC. Entre tanto, para el AP/Gateway de Perímetro se usan cables conectores Dupont y un cable USB para la energización del controlador electrónico. Para los demás componentes (enrutador de red, equipo de computo y dispositivo móvil) se usan sus respectivos cables.

**II. Conexiones electrónicas:** la comunicación de las señales electrónicas de sensado, control e información entre los diferentes componentes electrónicos. Se usan cables XH-2.54 en el Tomacorriente Inteligente y Dupont en el AP/Gateway de Perímetro

**III. Conexiones de comunicaciones:** implementadas para el enlace de red y la comunicación de la información entre los diferentes elementos y dispositivos del sistema de telegestión IoT. Para el caso de las conexiones cableadas, se usa un cable de red CAT 5E para la



conexión entre el enrutador de red y el equipo de computo, y una conexión por fibra óptica para la conexión del enrutador de red a la infraestructura del ISP para el acceso a Internet. Entre tanto, para las comunicaciones inalámbricas del sistema de telegestión IoT se realizan a través del protocolo WiFi sobre la frecuencia de 2.4 GHz y del protocolo de Internet HTTP con una conexión cliente/servidor.

### ***Componentes Misceláneos***

Adicional a todos los componentes especificados anteriormente, se requieren unos misceláneos específicos para el montaje del prototipo. Estos componentes incluyen un interruptor SPST, la tarjeta PCB del Tomacorriente Inteligente, tornillería para la sujeción de los componentes, las cajas de protección, entre otros.

### ***Aplicación móvil***

Se selecciona una aplicación móvil orientada hacia el IoT y que a la vez también tiene su propia plataforma IoT, lo cual genera compatibilidad entre la aplicación móvil y el servicio de Nube IoT. Así, se selecciona a Blynk (Blynk, 2022) la cual ofrece su aplicación móvil, Blynk IoT, y su plataforma IoT, Blynk Cloud. Blynk está enfocada exclusivamente hacia soluciones tecnológica IoT y sus servicios son compatibles con una amplia cantidad de dispositivos, controladores electrónicos y tarjetas de desarrollo. En cuanto a la aplicación móvil, esta permite crear y usar de forma fácil, gracias a los *widgets* predefinidos, GUI móviles directamente desde la aplicación, adicional que tiene una versión libre y gratuita.

### ***Plataforma de Nube IoT***

Existen plataformas que ofrecen un servicio IoT completo. Sin embargo suelen ser de pago. Por lo tanto, se decide usar diferentes plataformas para las diferentes funciones que debe realizar el servicio de Nube IoT.

El primer servicio IoT es la plataforma IoT Blynk Cloud. Se selecciona debido a que es del mismo desarrollador que la aplicación móvil elegida, lo cual genera una total compatibilidad de los servicios. Al igual que la aplicación móvil, en Blynk Cloud se crean GUI del tipo *Dashboard* a través de *Widgtes* predefinidos. No obstante, es desde esta plataforma que se realiza la programación del funcionamiento de ambas GUI (Móvil y *Dashboard*) a través de *Datastreams* que se enlazan con el controlador electrónico. Una ventaja de Blynk es la facilidad de enlazar, a través de diferentes interfaces físicas (USB, WiFi, GSM), dispositivos, controladores y tarjetas de desarrollo con la plataforma IoT y la aplicación móvil. Simplemente se requiere cargar la respectiva librería de Blynk y agregar el código de inicialización al código fuente del controlador electrónico.

El segundo servicio IoT a implementar realiza las funciones de registro histórico, procesamiento de la información y análisis estadístico. Para ello se elige la aplicación en Nube Google Sheets desde la cual se diseñan, desarrollan y gestionan hojas de cálculo que se pueden programar a partir de fórmulas y *scripts* para la gestión automatizada de los datos y la información. Adicional, la API de Google Sheets es compatible e interconectable con los controladores electrónicos seleccionados.

El tercer servicio IoT se usa para automatizar los procesos relacionados con los archivos de información de Google Sheets. Para ello, Google cuenta con App Scripts que permite programar y automatizar, a través de códigos tipo *Scripts*, diferentes procesos y tareas. App Scripts se usa en el proyecto para que el registro, procesamiento y análisis de información se realice de forma automatizada con poca intervención manual por parte del usuario.

Finalmente, el último servicio IoT a utilizar es el servicio de *Webhooks* ofrecido por la plataforma IFTTT. Este servicio enlaza de forma sencilla el controlador electrónico con Google Sheets para que los datos que se envían desde el AP/Gateway de Perímetro se registre en la respectiva hoja de calculo del archivo de registro histórico.

### ***Almacenamiento de archivos en Nube***

Siguiendo el uso de los servicios de Google, se escoge Google Drive para almacenar los archivos de Google Sheets. Google Drive, además de su almacenamiento gratuito de 15 GB, permite acceder a estos archivos desde cualquier dispositivo y ubicación geográfica desde que se cuente con acceso a Internet. Adicional, al ser un servicio de Google, la compatibilidad es total con los otros servicios que se usan, por lo que solo se requerirá una cuenta de usuario para acceder a estos.

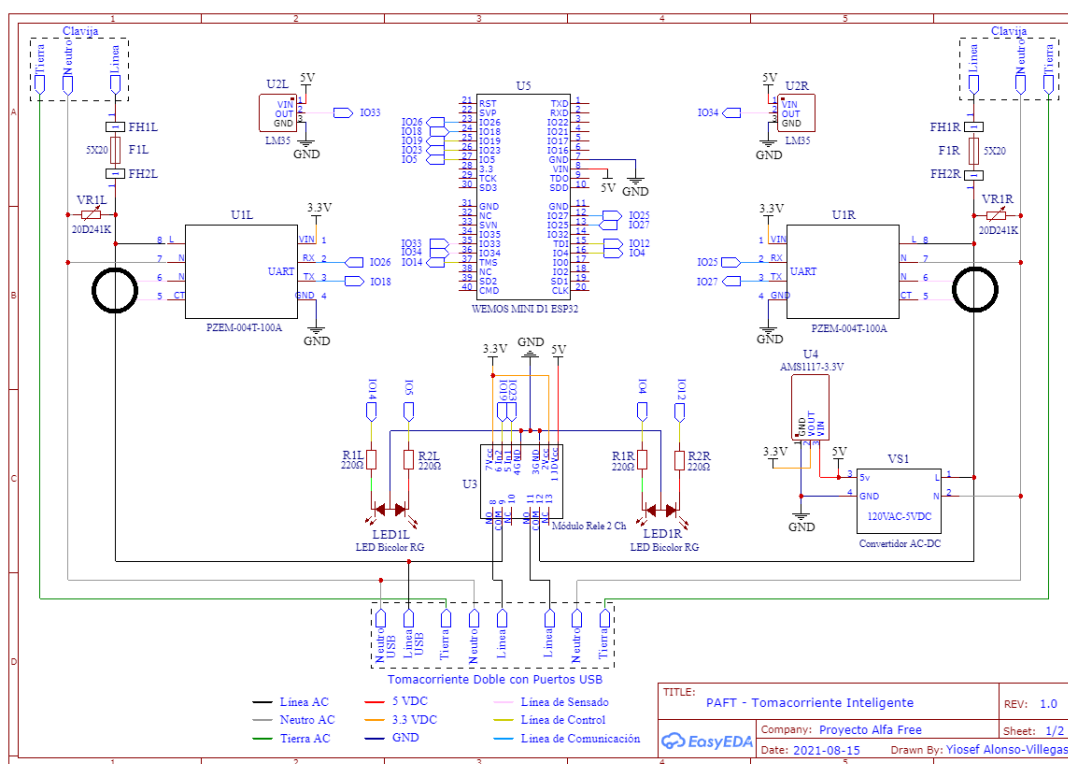
### **Diseño Estructural**

A partir de los modelos seleccionados (en el Anexo 5 se encuentra el listado completo de los componentes), se realiza el diseño estructural de los diferentes elementos. La cualidad principal de este diseño es que traslada desde el plano conceptual hacia el ámbito aplicado los resultados obtenidos en la etapa de diseño, tomando en cuenta las características y limitaciones

técnicas de los modelos comerciales escogidos.

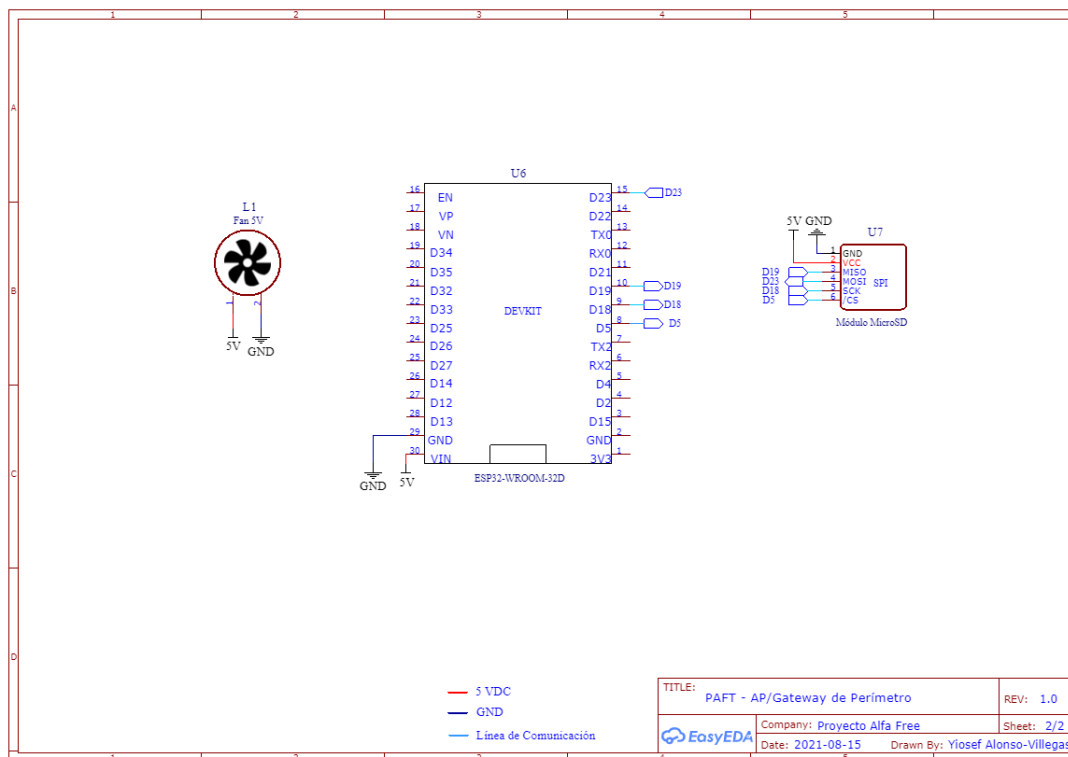
En la Figura 32 se muestra el esquemático electrónico del Tomacorriente Inteligente a través del cual se especifica las conexiones eléctricas y electrónicas requeridas, entre los diferentes componentes electrónicos. Igualmente en la Figura 33 se muestra el esquemático electrónico del AP/Gateway de Perímetro.

**Figura 32**  
*Esquemático del Tomacorriente Inteligente*



**Nota:** Esquemático electrónico con los componentes físicos seleccionados para el Tomacorriente Inteligente

En el Anexo 6 se muestra los diseños PCB del Tomacorriente Inteligente y el AP/Gateway de Perímetro, los cuales son fundamentales para facilitar el montaje físico y la distribución espacial de los componentes del prototipo.

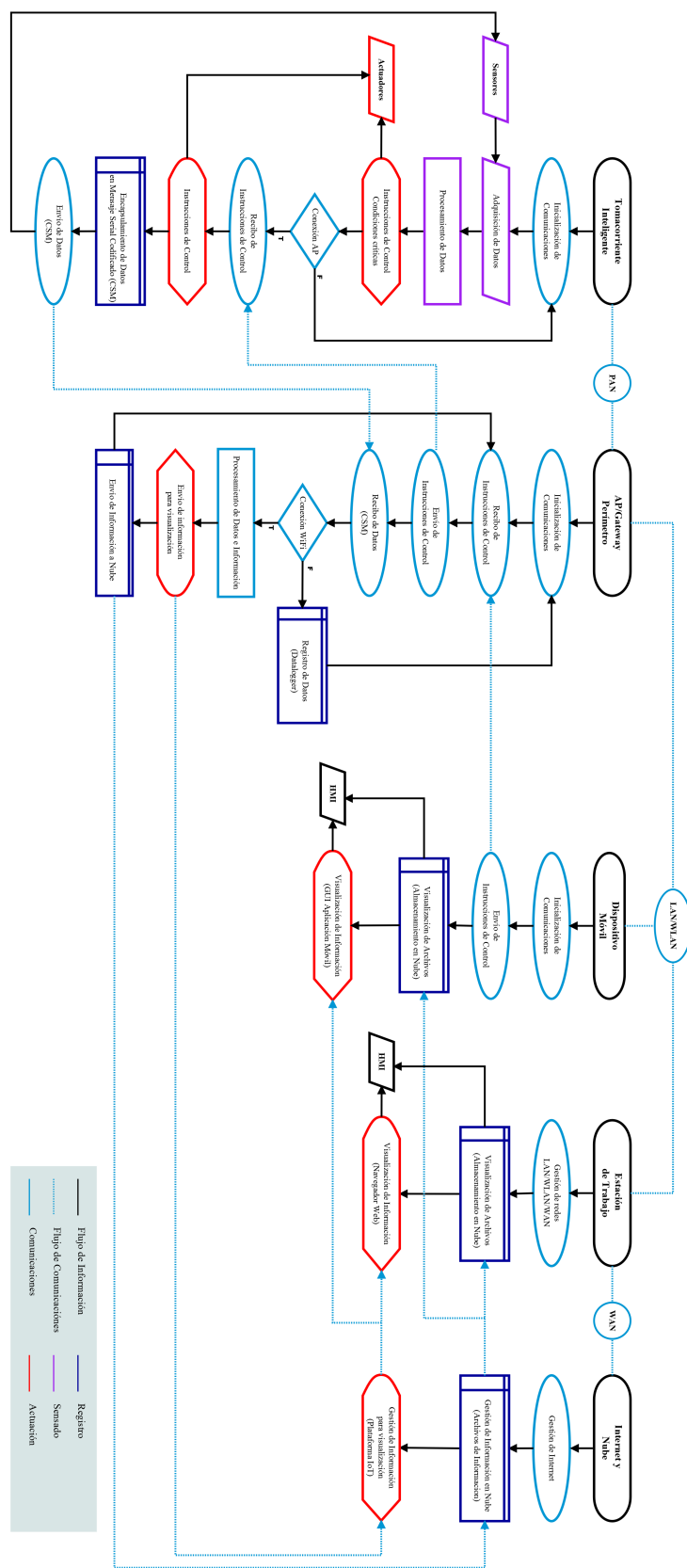
**Figura 33***Esquemático del AP/Gateway de Perímetro*

**Nota:** Esquemático electrónico con los componentes físicos seleccionados para el AP/Gateway de Perímetro

## Algoritmos

Para culminar el desarrollo estructural del prototipo, se realiza la programación de todos los algoritmos requeridos para el funcionamiento y la operación de los diferentes elementos del sistema de telegestión. En la Figura 34 se resume el algoritmo de funcionamiento y operación del sistema de telegestión IoT, que incluye los códigos fuente de los controladores electrónicos, la programación y *datastreams* de las GUI y los *scripts* de la automatización de procesos de los archivos de información.

**Figura 34**  
*Algoritmo General de Funcionamiento*



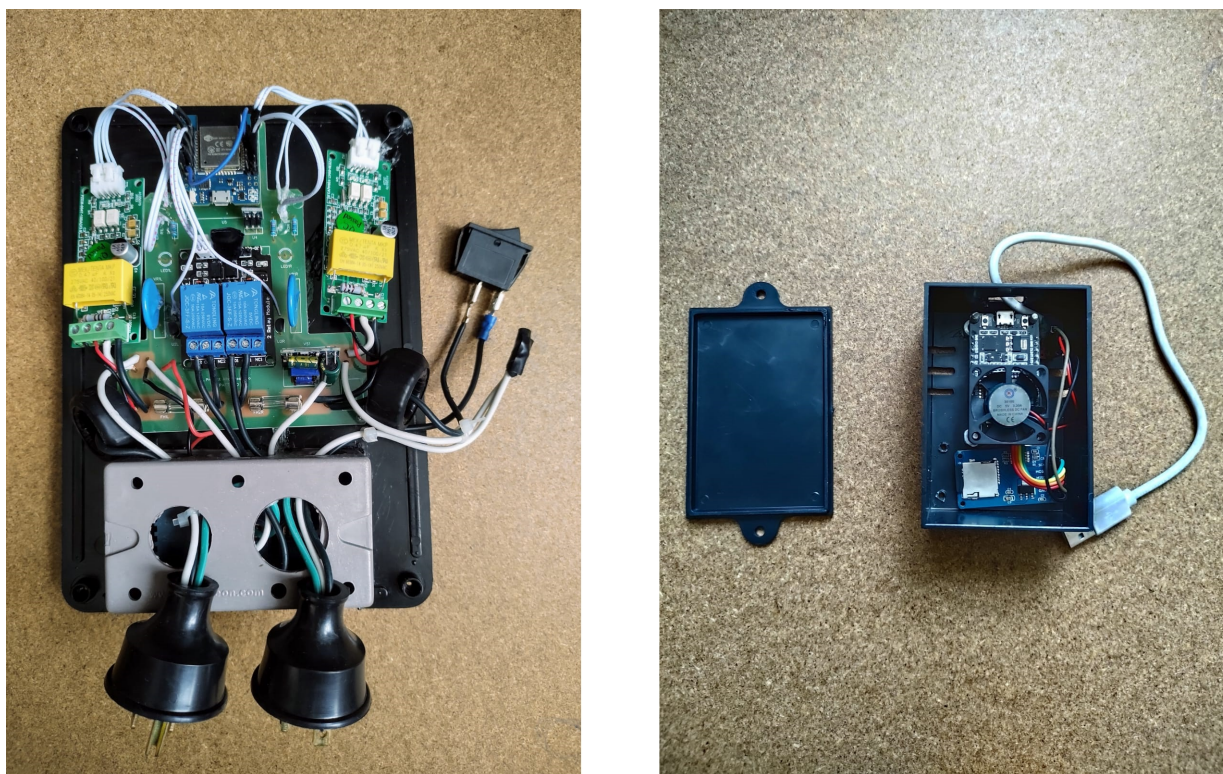
**Nota:** Este algoritmo resume la operación lógica de los elementos del Sistema de Telegestión IoT.

## Montaje Físico

Con los resultados obtenidos en el diseño estructural, los diseños electrónicos y los diferentes desarrollos realizados, se procede a realizar el montaje físico de los elementos del prototipo del sistema de telegestión IoT. El resultado final de la etapa de desarrollo es el prototipo montado, funcional y operacional en el cual se integran todos los elementos junto con los respectivos componentes y conexiones.

### Figura 35

*Montaje del Tomacorriente Inteligente y del AP/Gateway de Perímetro*

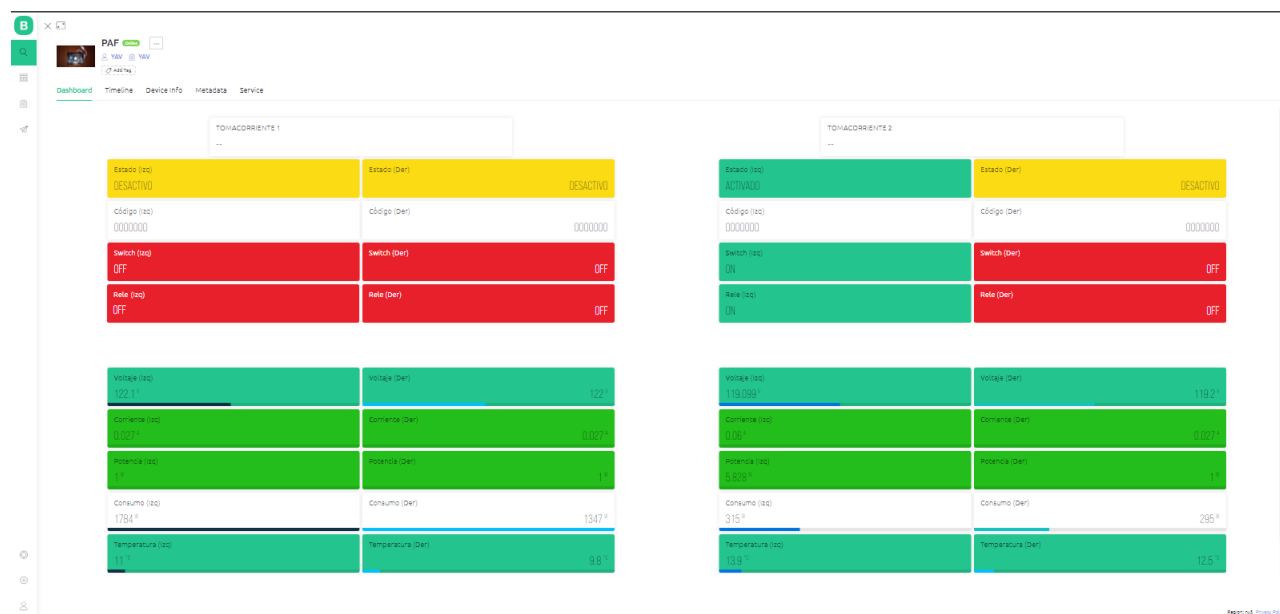


**Nota:** Izq.) Montaje de la tarjeta electrónica del Tomacorriente Inteligente en la cual destaca la PCB diseñada en la cual se montaron el controlador WeMos D1 Mini ESP32, el modulo de relés y los demás componentes electrónicos; los dos PZEM-004T-100A con los TCNI; y el montaje clavijas-tomacorriente. Der.) La caja del AP/Gateway de Perímetro con la tarjeta ESP32-WROOM-32D con su ventilador y el holder para MicroSD.

En la Figura 35 se muestran los montajes físicos realizados de la tarjeta electrónica del Tomacorriente Inteligente (Izq.) y de la caja del AP/Gateway de Perímetro (Der.). El montaje se organizó a partir del diseño estructural (esquemáticos electrónicos y diseños PCB) y realizando la agregación de los componentes especificados para cada elemento junto con las respectivas conexiones eléctricas, electrónicas y de comunicaciones.

Adicional, en las Figuras 36 y 37 se muestran el desarrollo y evidencia de funcionamiento de las GUI de la plataforma IoT, y de la aplicación móvil respectivamente. Entre tanto, en el Anexo 7 se presentan los archivos de información desarrollados (Registro, Procesamiento y Análisis).

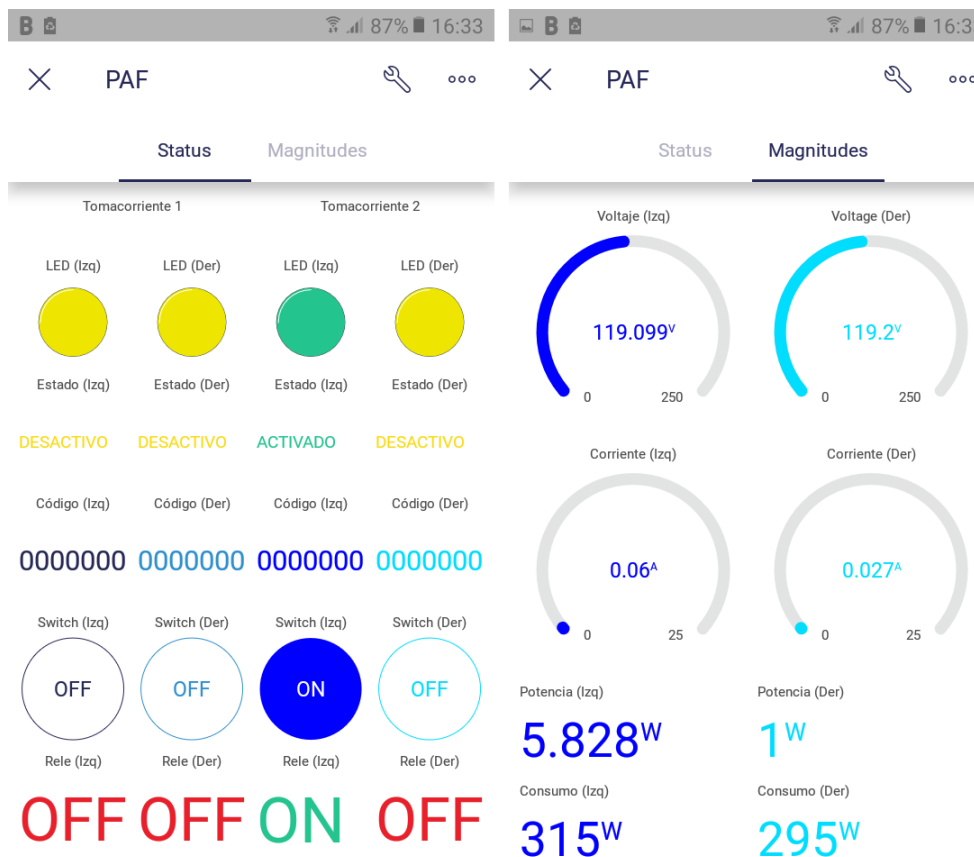
**Figura 36**  
*GUI de la Plataforma IoT*



**Nota:** Vista general de la GUI tipo *Dashboard* desarrollada en la plataforma IoT Blynk Cloud



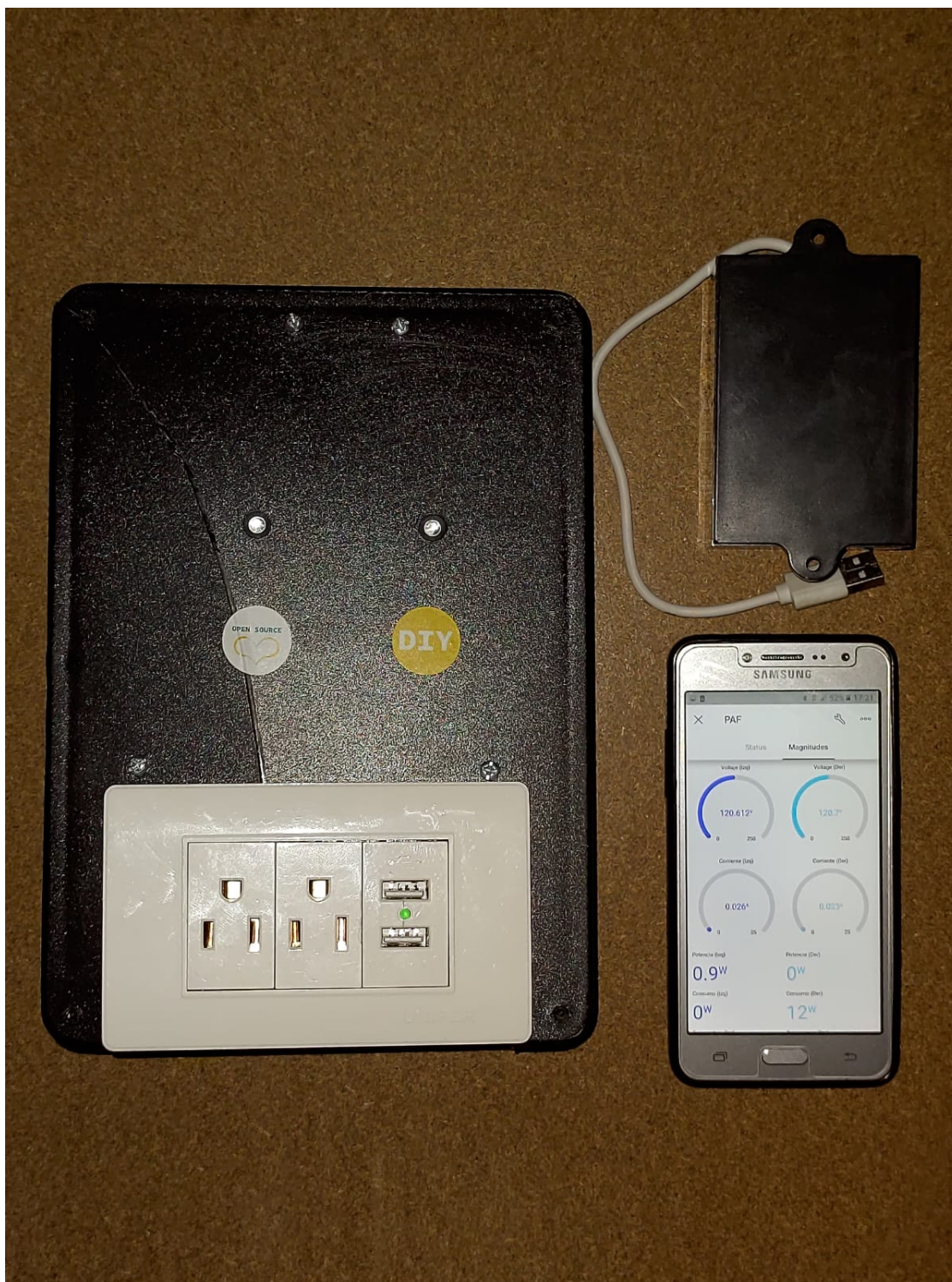
**Figura 37**  
*GUI de la Aplicación Móvil*



**Nota:** Vista general de la GUI desarrollada en la aplicación móvil Blynk IoT APP. Izq.) Pestaña de telecontrol y estados del Tomacorriente Inteligente. Der.) Pestaña de las variables eléctricas.

Por último, en la Figura 38 se muestra el montaje concluido del prototipo del sistema de telegestión IoT para tomacorrientes de 120 V 15 A, el cual, sin embargo, puede escalarse, realizando unas cuantas modificaciones estructurales, para tomacorrientes de hasta 240 V 20 A .

**Figura 38**  
*Montaje del prototipo del sistema de telegestión IoT*

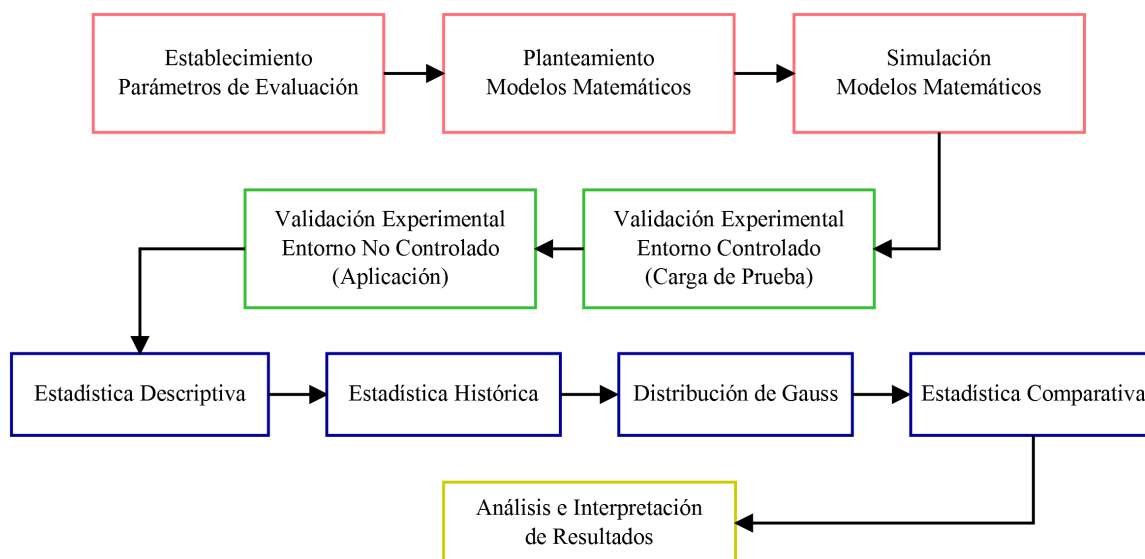


**Nota:** Se muestra las cajas montadas del Tomacorriente Inteligente y el AP/Gateway de Perímetro, y el dispositivo móvil con la GUI desarrollada en la aplicación móvil.

## Etapa de Evaluación

En la Figura 39 se presenta la ruta, con las respectivas actividades, para la evaluación del prototipo del sistema de telegestión IoT. Los resultados se evaluarán principalmente a partir de los análisis estadísticos planteados en *Validación Experimental* y *Análisis de Información*.

**Figura 39**  
*Ruta de Evaluación*



**Nota:** En rojo, se presenta las actividades relacionadas con la preparación previa de la evaluación. En verde, las actividades relacionadas con la validación experimental. En azul, las estadísticas que se aplicaran a los resultados. En amarillo, la actividad de análisis e interpretación de las estadísticas obtenidas.

## Parámetros de Evaluación

### *Carga de Prueba*

Para validar experimentalmente el prototipo desarrollado, se evalúa inicialmente en un entorno controlado en el cual se conecta el prototipo a una Carga de prueba. Con este procedimiento se comprobará las características presentadas en la Tabla 6 para el Tomacorriente Inteligente y se verificará el funcionamiento y operación de todos los elementos y componentes del sistema de telegestión IoT.

Para modelar las variables eléctricas siguiendo lo expuesto en la Tabla 4, se requiere que la Carga de prueba sea lo mas aproximado a un resistor puro, es decir, que no se presenten inductancias y capacitancias apreciables. Por lo tanto, se elige implementar como Carga de prueba un circuito paralelo con resistores de potencia de 20 W con una tolerancia del 5 %. Se aclara que aunque existen resistores de mayor potencia, debido a sus características físicas presentan una inductancia apreciable.

La configuración en paralelo tiene como ventajas principales la distribución de la corriente eléctrica, dividir la potencia eléctrica disipada por el circuito para evitar un alto valor del efecto Joule y la capacidad de modificar la configuración del circuito para variar el consumo eléctrico de la Carga de prueba.

Es importante conocer que el valor nominal de tensión  $V_S$  para la red eléctrica a la cuál se conectará el sistema de telegestión IoT es de 120 V. Empero,  $V_S$  cuenta con una tolerancia máxima del 5 % y mínima del -10 % del valor nominal (CODENSA, 2015) por lo que el valor medido de tensión de la red eléctrica y la Carga de prueba pueden variar aproximadamente entre 108 y 126 V.

Con base a la información anterior, se realizan los cálculos matemáticos de las variables eléctricas de la Carga de prueba. Siguiendo las leyes de Ohm (Eq. 1) y de Watt (Eq. 7), teóricamente la máxima intensidad de corriente  $I_n$  que puede circular por cada resistor del circuito es

$$I_n = \frac{20 \text{ W}}{120 \text{ V}} = 0,16\bar{6} \text{ A} \quad (18)$$

por lo tanto, la resistencia  $R_n$  de cada resistor debe ser

$$R_n = \frac{(120 \text{ V})^2}{20 \text{ W}} = 720 \Omega \quad (19)$$

No obstante, comercialmente se encontró que el resistor de 20 W de valor mas cercano es de 820  $\Omega$  por lo que  $I_n$  será

$$I_n = \frac{120 \text{ V}}{820 \Omega} \approx 0,146 \text{ A} \quad (20)$$

para una potencia eléctrica disipada  $P_n$  por cada resistor de

$$P_n = \frac{(120 \text{ V})^2}{820 \Omega} \approx 17,561 \text{ W} \quad (21)$$

La Carga de prueba se configura para poder usar entre  $n_0 = 1$  hasta  $n_{max} = 10$  resistores para así variar la potencia eléctrica demandada, y por consiguiente, el consumo del circuito. Por lo tanto, la máxima corriente  $I_{max}$  y la máxima potencia disipada  $P_{max}$  por la Carga de prueba son:

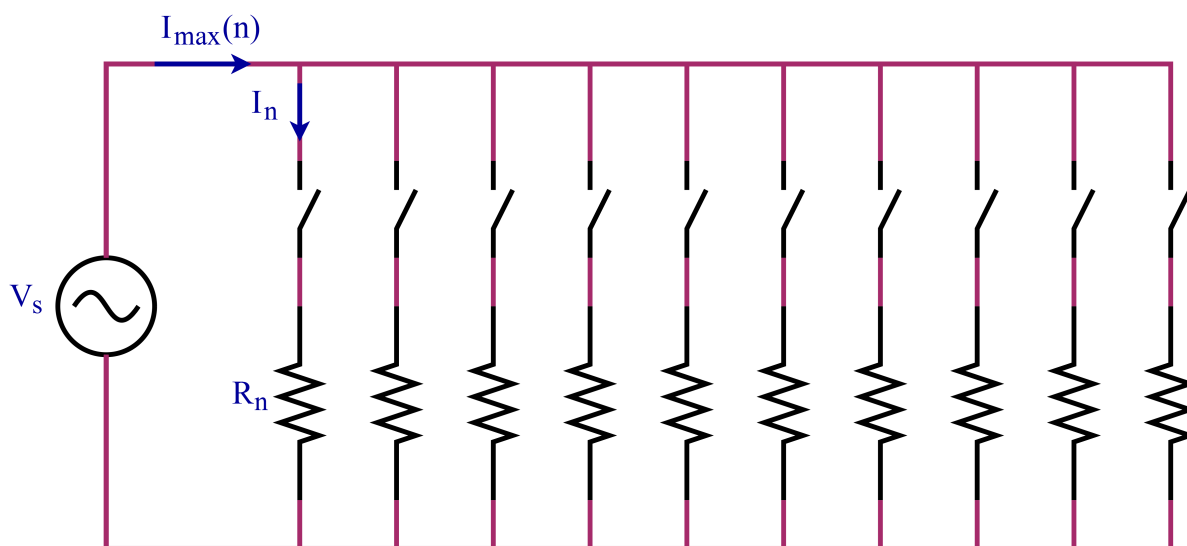
$$I_{max} = I_n \cdot n_{max} \approx 1,463 \text{ A} \quad (22)$$

$$P_{max} = P_n \cdot n_{max} \approx 175,610 \text{ W} \quad (23)$$

El circuito eléctrico ideal de la Carga de prueba se muestra en la Figura 40.

**Figura 40**

*Circuito ideal de la Carga de prueba*



**Nota:** Se incluyen unos conmutadores (idealmente de resistencia nula) para conectar y desconectar los resistores con el fin de variar la potencia demandada por el circuito

### **Pruebas**

Para la evaluación del prototipo desarrollado y de las variables eléctricas, se plantean las tres (3) pruebas de la Tabla 13.

**Tabla 13***Pruebas para la evaluación del prototipo*

<b>Prueba</b>	<b>Cant. resistores conectados</b>
Carga Mínima	1
Carga Media	5
Carga Máxima	10

**Nota:** Se presentan las 3 pruebas a realizar para la validación experimental con la Carga de prueba

### ***Parámetros***

Es importante aclarar que cada una de las tres pruebas detalladas anteriormente se realizará tanto para la sección Izquierda del Tomacorriente Inteligente como para la sección Derecha. Paralelamente a las mediciones que se realicen con el Tomacorriente Inteligente, se realizarán cada cierto tiempo mediciones de tensión, corriente y temperatura con un multímetro para realizar el respectivo análisis comparativo. Los parámetros generales de las pruebas se especifican a continuación:

- **Cantidad de instrumentos:** 3 (Sección Izquierda, Sección Derecha y Multímetro)
- **Cantidad de pruebas individuales**  $p_n = 3$
- **Cantidad total de pruebas**  $p = p_n \cdot 2 \text{ secciones} = 6$
- **Tiempo por prueba**  $t_p = 6 \text{ h}$
- **Tiempo acumulado de pruebas**  $T_p = t_p \cdot p = 36 \text{ h}$
- **Tiempo de muestreo - Tomacorriente Inteligente**  $t_s = \text{Idealmente } 1 \text{ min}, N = 360$   
muestras de cada variable por prueba

- **Tiempo de muestreo - Multímetro**  $t_m$  = Idealmente 60 min, 6 muestras de cada variable por prueba.

Es importante tener presente que el Tomacorriente Inteligente esta programado para realizar la actualización de valores de las variables eléctricas cada un (1) minuto. Sin embargo cuando se produce alguna condición crítica, se genera una actualización inmediata en los servicios de Nube, por lo que se puede dar el caso que en un (1) minuto se registren varias mediciones

### **Mediciones**

Las mediciones que se realizaran por cada prueba se agrupan en cuatro (4) categorías:

**I. Mediciones del Tomacorriente Inteligente:** Cada sección entrega cada un (1) minuto idealmente las mediciones de tensión  $V_{TI}$ , intensidad de corriente  $I_{TI}$ , potencia activa  $P_{TI}$ , consumo eléctrico  $U_{ETI}$  y temperatura interna del Tomacorriente Inteligente  $T_{TI}$

**II. Mediciones con Multímetro:** Cada una (1) hora se realiza las mediciones de tensión de la Carga de prueba  $V_L$ , intensidad de corriente del Circuito de prueba  $I_L$  y temperatura interna del Tomacorriente Inteligente media con multímetro  $T_M$ . Igualmente se calcula la potencia eléctrica  $P_L$  que disipa la Carga de prueba a partir de  $V_L$  e  $I_L$ . Finalizada la prueba, se extrae del registro del Tomacorriente Inteligente las mediciones de  $V_{TI}$ ,  $I_{TI}$ ,  $P_{TI}$ ,  $U_{ETI}$  y  $T_{TI}$  del mismo instante de tiempo en las que se tomaron las mediciones con multímetro.

**III. Mediciones Iniciales y Finales de Standby:** Al inicio de cada prueba, priori a la activación de la Carga de prueba, y después de cada prueba, posterior a la desactivación, se espera un par de minutos a que se registren las mediciones de *standby* de tensión  $V_{sb}$ , de corriente  $I_{sb}$  y de potencia eléctrica  $P_{sb}$



**IV. Mediciones Iniciales y Finales:** Conforme al modelo matemático aproximado, explicado mas adelante, al inicio de cada prueba, priori conexión de todo el Circuito de prueba, y después de cada prueba, posterior a la desconexión, se realizan las mediciones con multímetro de la tensión de la red eléctrica  $V_S$ , de las resistencias de fase  $R_A$  y de neutro  $R_P$  de la extensión eléctrica, de las resistencias de fase  $R_F$  y de neutro  $R_N$  del Circuito de prueba, de la resistencia de la Carga de prueba  $R_L$ , de la resistencia total de todo el Circuito de prueba  $R_T$  y de la temperatura ambiente  $T_a$

### **Modelos Matemáticos y Simulaciones**

Conocidos los parámetros de evaluación, y a partir del marco conceptual y la fundamentación física presentada en el *Marco Conceptual*, se realizan los modelos matemáticos de las variables eléctricas de resistencia, tensión, intensidad de corriente, potencia y consumo eléctrico.

#### ***Modelo Ideal***

El modelo ideal se corresponde con los valores teóricos de las variables eléctricas tomando como referencia el circuito eléctrico ideal de la Carga de prueba (Fig. 40).

Conocida la resistencia ideal de cada resistor ( $820 \Omega$ ), la cantidad de resistores que se pueden conectar ( $n = 1$  a  $10$ ), y el valor nominal de la tensión de la red eléctrica ( $V_S = 120 \text{ V}$ ), se obtiene el modelo matemático ideal aplicando las siguientes ecuaciones:

Para la resistencia equivalente total  $R_T$  del circuito y la cual es dependiente de la cantidad  $n$  de resistores conectados,

$$R_T(n) = \frac{1}{\frac{1}{820} \cdot n} \quad (24)$$

para la tensión de entrada al circuito se toma el valor nominal  $V_S$  de la red eléctrica como constante,

$$V_S = 120 \text{ V} \quad (25)$$

para la corriente total  $I_T$  que circula por el circuito y la cual es dependiente de  $R_T$ ,

$$I_T(R_T) = \frac{V_S}{R_T} \quad (26)$$

para la potencia eléctrica total  $P_T$  que disipa la Carga de prueba y la cual es dependiente de  $R_T$ ,

$$P_T(R_T) = \frac{(V_S)^2}{R_T} \quad (27)$$

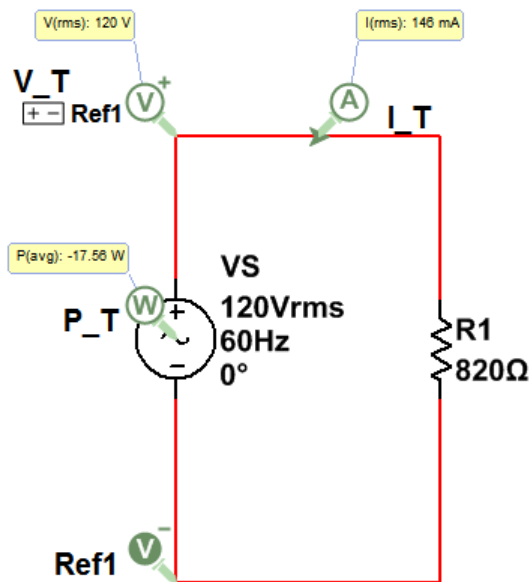
obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 14 para cada una de las tres configuraciones de las pruebas a realizar para la validación experimental del prototipo. Adicional, las simulaciones de las variables  $V_S$ ,  $I_T$  y  $P_T$  para las tres configuraciones se muestran respectivamente en las Figuras 41, 42 y 43. En el Anexo 8 se presenta los resultados del Modelo matemático ideal para cada una de las diez posibles configuraciones de la Carga de prueba.

**Tabla 14***Modelo Matemático Ideal de las Variables Eléctricas*

Cant. resistores ( $n$ )	Resistencia Equivalente ( $R_T$ ) [ $\Omega$ ]	Tensión Entrada ( $V_T$ ) [V]	Corriente Total ( $I_T$ ) [A]	Potencia Total ( $P_T$ ) [W]
1	820	120	0.146	17.561
5	164	120	0.732	87.805
10	82	120	1.463	175.610

**Nota:** Modelo Matemático Ideal de las variables eléctricas para las configuraciones de las 3 pruebas

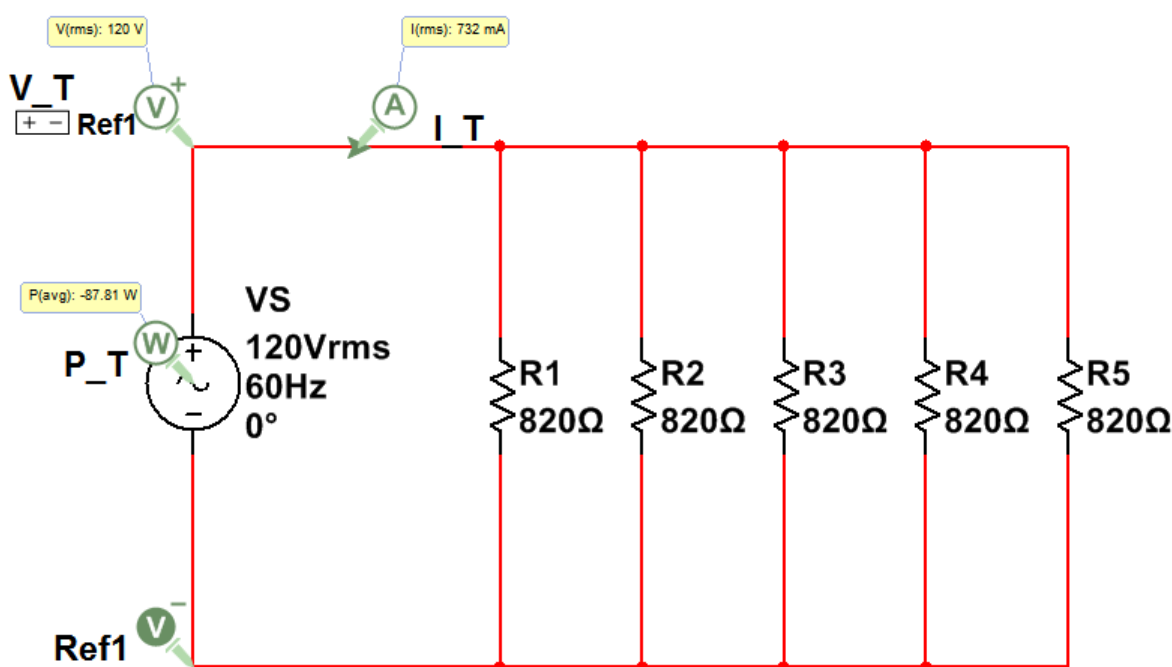
En la Figura 41 se muestra la simulación de la Carga de prueba con  $n = 1$  resistor, siendo esta configuración la correspondiente con la carga mínima que se puede obtener.

**Figura 41***Simulación del Modelo Ideal para 1 Resistor*

**Nota:** Simulación del Modelo ideal para 1 resistor. Se muestran las variables de tensión  $V_S$ , de la corriente total  $I_T$  y de la potencia eléctrica total demandada por el circuito  $P_T$ .

En la Figura 42 se muestra la simulación de la Carga de prueba con  $n = 5$  resistores. A medida que se agregan más resistores en paralelo,  $I_T$  aumenta, y por consiguiente,  $P_T$  también. Así, se puede variar el consumo eléctrico de la Carga de prueba para aumentarlo o disminuirlo. La proporción de variación de  $I_T$  y  $P_T$  es lineal con respecto a  $n$ , es decir, ambas variables aumentan en  $n$  veces según la cantidad de resistores adicionales.

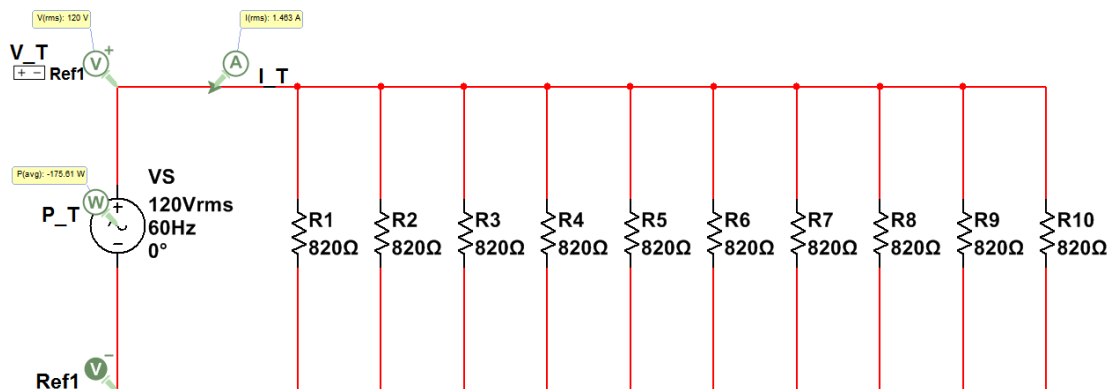
**Figura 42**  
Simulación del Modelo Ideal para 5 Resistores



**Nota:** Simulación del Modelo ideal para 5 resistores. Se muestran las variables de tensión  $V_S$ , de la corriente total  $I_T$  y de la potencia eléctrica total demandada por el circuito  $P_T$ . Notese que  $V_S$  se mantiene constante en el valor de 120 V.

En la Figura 43 se muestra la simulación de la Carga de prueba con  $n = 10$  resistores, correspondiéndose con la máxima carga que se puede obtener. Notese que, idealmente, sin importar la cantidad de resistores en paralelo, debido a la LTK (Eq. 5) y siguiendo lo expuesto en la Tabla 3, la tensión en todos los resistores siempre será igual a  $V_S$ .

**Figura 43**  
*Simulación del Modelo Ideal para 10 Resistores*



**Nota:** Simulación del Modelo ideal para 10 resistores. Se muestran las variables de tensión  $V_S$ , de la corriente total  $I_T$  y de la potencia eléctrica total demandada por el circuito  $P_T$ . Nótese que  $V_S$  se mantiene constante en el valor de 120 V

Para el consumo eléctrico, siguiendo el método de calculo acumulativo horario mostrado en *Consumo Eléctrico*, se multiplica la potencia total que disipa el circuito  $P_T$  según la cantidad  $n$  de resistores conectados, por el tiempo  $t_p$ , en horas, que duran conectados los resistores. Así, a partir de lo planteado en la Tabla 13, se realiza el cálculo del consumo eléctrico total  $U_E$  esperado para cada prueba, resultados que se muestran en la Tabla 15.

**Tabla 15**  
*Consumo total ideal esperado por cada prueba*

Prueba	Cant. resistores ( $n$ )	Potencia total del circuito ( $P_T(n)$ ) [W]	Tiempo de operación ( $t_p(n)$ ) [h]	Consumo Total ( $U_E$ ) [Wh]
Carga Mínima	1	17.561	6	105.366
Carga Media	5	87.805	6	526.829
Carga Máxima	10	175.610	6	1053.659

**Nota:** Se presenta el consumo eléctrico esperado por cada prueba a partir de la potencia demandada según la configuración de la Carga de prueba

### ***Modelo Aproximado: Resistencias Adicionales***

Debido a diferentes factores, en un escenario real, es improbable tener un circuito perfecto como el mostrado en la Figura 40, debido a la adición de otros componentes como el Tomacorriente Inteligente, el cableado, los componentes de conmutación, las pistas de soldadura de los circuitos impresos, entre otros; los cuales agregan resistencias adicionales a todo el circuito eléctrico y las cuales se deben tener en cuenta en los modelos matemáticos para disminuir los errores sistemáticos en la validación experimental del prototipo y los análisis de los resultados (Ardila, 2007).

Para conocer dichas resistencias adicionales, primero se realiza el montaje físico del Circuito y de la Carga de prueba (Anexo 10) con todos los componentes requeridos para su operación. Referente a este montaje se realizan las siguientes aclaraciones:

El Circuito de prueba se divide en cuatro (4) subcircuitos: Red y extensión eléctrica, Tomacorriente Inteligente, Selector, y Carga de prueba.

Las resistencias adicionales se derivan principalmente de las líneas de conexiones en las cuales se incluyen una extensión eléctrica que conecta el Tomacorriente Inteligente con la red eléctrica, un cable de conexión para conectar la Carga de prueba al Tomacorriente Inteligente, cableado eléctrico para otras conexiones menores y las pistas de soldadura de los circuitos. Como componentes adicionales se tienen las clavijas y tomacorrientes, las borneras en bloque para la conexión del cableado eléctrico, las borneras KF301, los interruptores y relés, los conectores, los componentes electrónicos del Tomacorriente Inteligente y el multímetro.

Por cuestiones técnicas y económicas, se elige unos conmutadores tipo Jumper para cada resistor de la Carga de prueba. Cada conmutador consta de una bornera KF301 y un trozo de

alambre (del mismo tipo que el de los resistores) que actúa como Jumper. Si se desea desconectar un resistor de la Carga de prueba, solamente se desconecta un extremo del alambre de la bornera, aislando el resistor del resto del circuito. Cada bornera KF301 ofrece una resistencia adicional en serie al resistor aproximadamente de  $20\text{ m}\Omega$ .

A partir del requerimiento de las dos mediciones (corriente y tensión) que se realizan en la Carga de prueba, se usan dos pares de puntas de medición: un par, el de medición de corriente, se conecta a la bornera en bloque en la cual está conectado el cable de conexión de la Carga de prueba; y el otro par, medición de tensión, se conecta a una bornera KF301 la cual se instala paralela y en la entrada del subcircuito de los resistores (Carga de prueba). Dependiendo de la medición que se realice, así mismo se conecta el multímetro al respectivo par de puntas de medición. Esto evita tener que usar dos multímetros diferentes para cada medición.

Se implementa un interruptor selector SP3T (Un polo, Tres posiciones): una posición para seleccionar el circuito de medición de corriente, una para la operación directa (sin pasar por circuito para la medición de corriente), y otra para el apagado de la Carga de prueba.

El circuito de medición de corriente se implementa debido a la limitación técnica del multímetro, el cual usa el método Shunt para medir la corriente, por lo que mantener conectado el multímetro a la Carga de prueba generará, primero, que el resistor Shunt aumente su temperatura, y por lo tanto su resistencia nominal, debido a la circulación constante de la corriente afectando la exactitud de la medición; y segundo, derivado de lo anterior, se genere una caída de potencial eléctrico en el resistor Shunt y se afecte la tensión, y su medición, en la Carga de prueba. Así, con el interruptor SP3T se selecciona el circuito de medición de corriente únicamente cuando se vaya a realizar dicha medición.

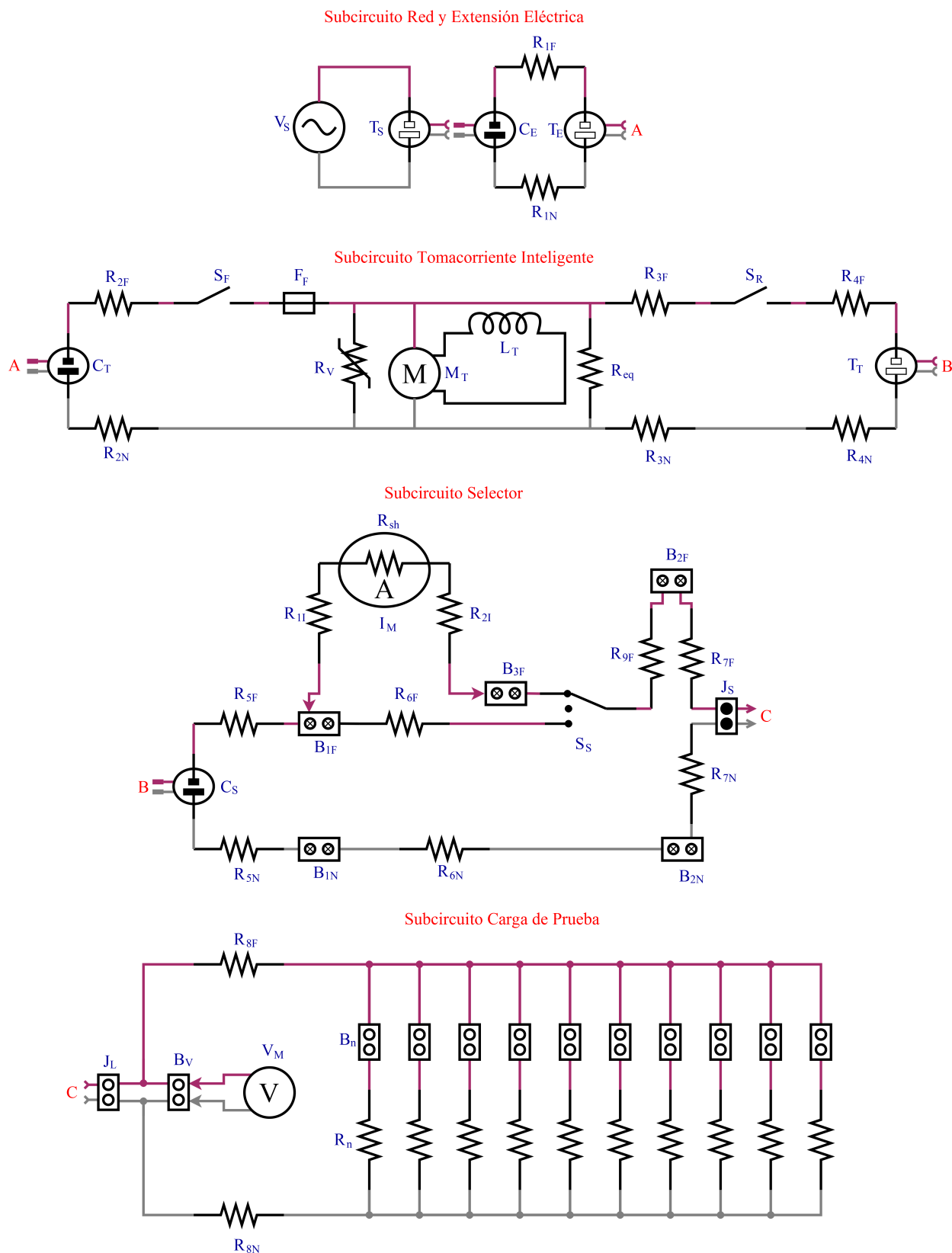
Los resistores disipan toda la potencia eléctrica en forma de calor, por lo que se generan

una altas temperaturas (aproximadamente 180 °C en cada resistor. Ver Anexo 9 Fig. 102) respecto a la temperatura ambiente. Al aumentar la temperatura, la resistencia tenderá a aumentar también, por lo que para evitar un aumento excesivo que pueda afectar el comportamiento eléctrico del Circuito de prueba, y por lo tanto las mediciones, se instala un sistema de refrigeración triple (2 disipadores de calores de aluminio, 2 extractores de aire, y 1 ventilador) con el fin de mitigar el aumento de temperatura en los resistores (se logra reducir la temperatura hasta en 70 °C. Ver Anexo 9 Fig. 103).

Se desprecia toda inductancia y capacitancia que se genera en el circuito por lo que se considera el circuito meramente como resistivo para poder aplicar el modelamiento DC. Empero, se debe considerar este error sistemático en en los diferentes análisis, especialmente el de potencia.

El esquemático que representa el Circuito de prueba implementado, y en el cual se plasman los cuatro subcircuitos con los componentes y las resistencias equivalentes adicionales planteadas, se muestra en la Figura 44. Nótese que dicho esquemático difiere ampliamente del circuito ideal (Fig. 40).



**Figura 44***Esquemático del Circuito de prueba*

**Nota:** Se muestran las resistencias equivalentes adicionales y los componentes adicionales de cada uno de los 4 subcircuitos.

En este punto se aclara la inclusión del Tomacorriente Inteligente en el circuito equivalente anterior, lo cual es relevante para los análisis de las mediciones. Adicional a lo ya conocido sobre las resistencias adicionales que se generan por las líneas de conducción es importante conocer que el Tomacorriente Inteligente genera una demanda adicional de energía para el funcionamiento de sus componentes electrónicos. Debido a que el medidor eléctrico mide la totalidad de la corriente que fluye desde la red eléctrica y atraviesa todo el Circuito de prueba, se debe conocer el valor de tensión, corriente y potencia que se demanda exclusivamente para el funcionamiento de los componentes electrónicos del Tomacorriente Inteligente cuando no se tiene ninguna carga eléctrica conectada. En otras palabras, los valores *standby*  $V_{sb}$ ,  $I_{sb}$  y  $P_{sb}$ , los cuales se deben tener en cuenta para realizar las respectivas correcciones en los análisis de las mediciones, aunque teniendo presente que los valores *standby* de cada sección del Tomacorriente Inteligente serán diferentes debido a su diseño electrónico. Igualmente, es importante conocer que, debido a las resistencias adicionales de la extensión eléctrica, la tensión  $V_{TI}$  medida por el medidor eléctrico no será igual a la tensión de la red eléctrica, debido a las caídas de tensión en las líneas de la extensión.

Precisamente la importancia de conocer las resistencias adicionales radica en que, debido a las leyes de Kirchoff y de Ohm, en cada resistencia en serie se produce una caída de tensión cuando es atravesada por una corriente eléctrica. Por lo tanto, las tensiones medibles en el medidor eléctrico del Tomacorriente Inteligente y con el multímetro en la Carga de prueba, serán menores a la medida en la red eléctrica antes de conectar todo el Circuito de prueba. Precisamente con el modelo aproximado se busca, más que predecir los valores de las mediciones, calcular el Error Relativo Porcentual (Tolerancia) que se espera obtener en las mediciones frente al modelo ideal debido a las resistencias adicionales.

***Modelo Aproximado: Modelamiento***

Para el calculo de las resistencias adicionales, se opta por realizar una aproximación práctica. Primeramente se realiza un análisis de circuitos sobre el circuito de la Figura 44 para obtener la equivalencia de las resistencias adicionales de las lineas de fase y de neutro que se encuentran en serie en los subcircuitos de la Red y extensión eléctrica, Tomacorriente Inteligente y Selector; la equivalencia de los componentes en paralelo del subcircuito del Tomacorriente Inteligente; y la equivalencia serie-paralelo de las resistencias del subcircuito de la Carga de prueba:

Las resistencias equivalentes  $R_A$  de la linea de fase entre  $C_E$  y  $S_R$  inclusive es

$$R_A = F_F + S_F + S_R + R_{1F} + R_{2F} + R_{3F},$$

$R_P$  de la linea de neutro entre  $C_E$  y  $T_T$

$$R_P = R_{1N} + R_{2N} + R_{3N} + R_{4N},$$

$R_F$  de la linea de fase entre  $S_R$  y  $B_V$

$$R_F = S_S + B_{1F} + B_{2F} + R_{4F} + R_{5F} + R_{6F} + R_{7F} + R_{9F},$$

$R_N$  de la linea de neutro entre  $C_S$  y  $B_V$

$$R_N = B_{1N} + B_{2N} + R_{5N} + R_{6N} + R_{7N},$$

$R_L$  de la Carga de prueba, la cual depende de la cantidad  $n$  de resistores conectados

$$R_L(n) = R_{8F} + R_{8N} + \frac{1}{\frac{1}{820} \cdot n},$$

y  $R_{TI}$  de los componentes del Tomacorriente Inteligente

$$R_{TI} \equiv R_V, M_T, R_{eq}$$

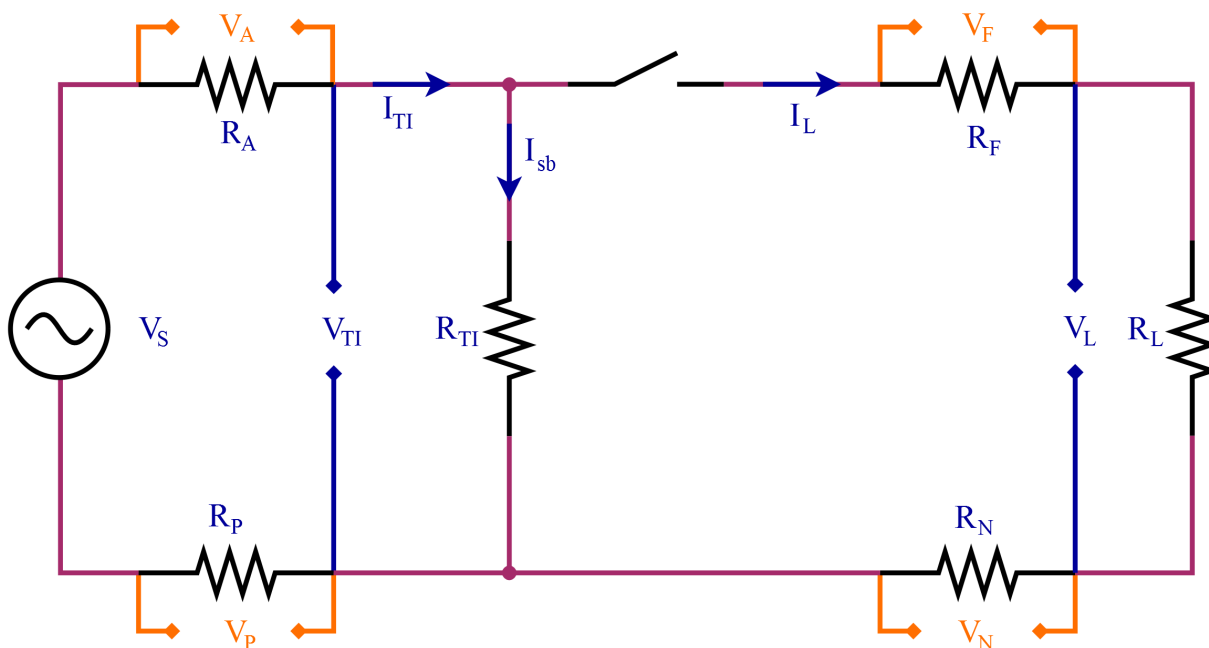
obteniendo las 6 resistencias equivalentes del Circuito de prueba, las cuales se muestran en la

Figura 45

Con lo anterior, se plantea la resistencia equivalente total  $R_T$  del Circuito de prueba como:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_A + R_F + R_P + R_N + R_L} + \frac{1}{R_{TI}}} \quad (28)$$

**Figura 45**  
Circuito equivalente de prueba

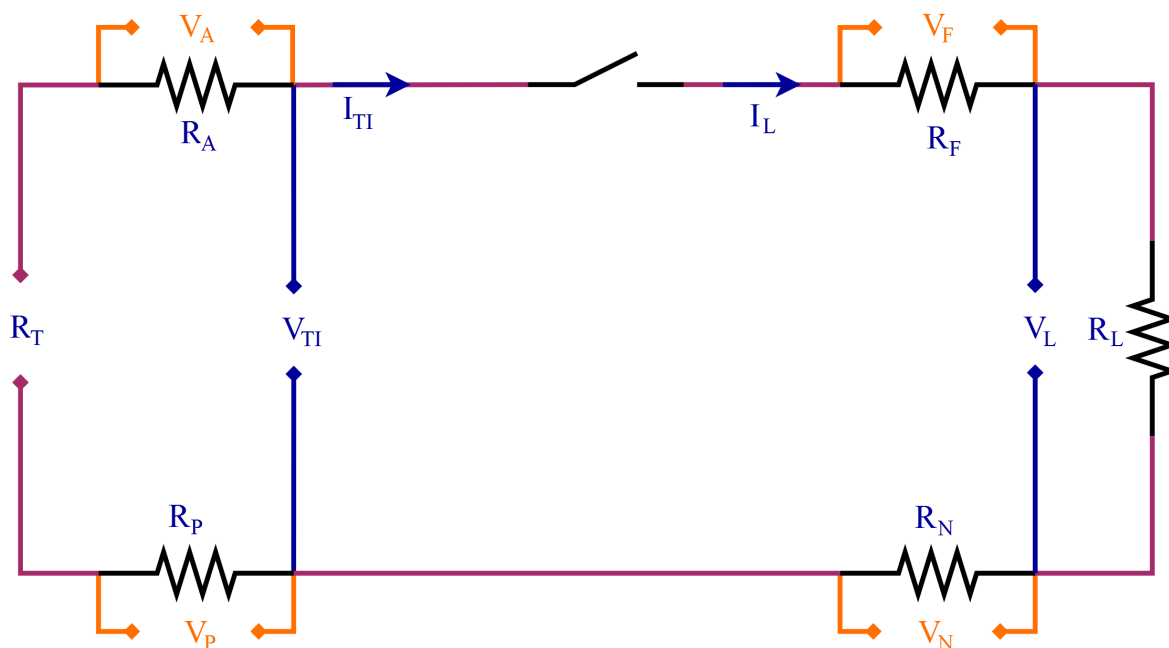


**Nota:** Se muestran las 6 resistencias equivalentes de todas las resistencias y componentes adicionales del Circuito de prueba. El interruptor representa el conmutador del relé del Tomacorriente Inteligente, y si esta abierto (OFF),  $V_{TI} = V_{sb}$ .

No obstante,  $R_{TI}$  no representa totalmente una resistencia física como tal sino es una equivalente según la potencia eléctrica demandada de los componentes electrónicos del Tomacorriente Inteligente. En otras palabras, el valor de  $R_{TI}$  es variable al depender de la potencia que demande el Tomacorriente Inteligente, y por lo tanto, si el Tomacorriente Inteligente no esta energizado,  $R_{TI}$  se comporta idealmente como un circuito abierto y las demás resistencias equivalentes quedan en serie. Así, el Circuito Equivalente de Prueba cuando no se encuentra energizado ( $V_S = 0$ ) se aproxima al mostrado en la Figura 46 y  $R_T$  se aproxima según la Ecuación 29.

$$R_T = R_A + R_F + R_P + R_N + R_L \quad (29)$$

**Figura 46**  
Circuito Equivalente de Prueba Desenergizado



**Nota:** Circuito equivalente de prueba cuando se encuentra desenergizado ( $V_S = 0$ ) y por lo tanto  $R_{TI} = \infty$ . El interruptor representa el conmutador del relé del Tomacorriente Inteligente y si esta abierto (OFF),  $V_{TI} = V_{sb}$ .

Partiendo de las mediciones iniciales y finales que se realizan en cada prueba, se obtiene un conjunto de 24 muestras por cada una de las resistencias  $R_A$ ,  $R_P$ ,  $R_F$ ,  $R_N$ ,  $R_L$  y  $R_T$  cuando el circuito esta desenergizado; de la tensión de la red eléctrica  $V_S$  priori a la conexión de todo el Circuito de prueba; y de los valores de *standby* de la tensión  $V_{sb}$ , corriente  $I_{sb}$  y potencia  $P_{sb}$  del Tomacorriente Inteligente priori la conexión de la Carga de prueba.

En la Tabla 16 se muestran los valores mínimos, medios y máximos obtenidos de la Estadística Descriptiva aplicada en las mediciones de las anteriores variables. Notese que  $V_S$  no presentó un valor constante sino aproximadamente una variación entre el -1.42 % y el 1.08 % del valor nominal de 120 V, lo cual se debe tener en presente para el modelamiento matemático. Se

aclara que la sección Izquierda presenta valores de corriente y potencia de *standby*, mientras que la Derecha no, debido a que es a esta sección en la cual está conectado el conversor AC/DC, que alimenta los componentes electrónicos del Tomacorriente Inteligente, y por lo tanto desde su encendido ya se genera una demanda de potencia de *standby*.

**Tabla 16**  
*Valores de las Variables Adicionales*

Variable	Unidad	Mínimo medido (a)	Medio calculado (p)	Máximo medido (b)
$R_A$	$\Omega$	1.3	1.433	1.5
$R_P$	$\Omega$	1.3	1.300	1.3
$R_F$	$\Omega$	0.3	0.396	0.5
$R_N$	$\Omega$	0.2	0.200	0.2
$V_S$	V	118.3	119.738	121.3
$V_{sb}$ (Izq)	V	118.1	119.417	120.8
$I_{sb}$ (Izq)	A	0.005	0.006	0.009
$P_{sb}$ (Izq)	W	0.6	0.758	1.0
$V_{sb}$ (Der)	V	118.3	120.136	121.5
$I_{sb}$ (Der)	A	0.000	0.000	0.0
$P_{sb}$ (Der)	W	0.0	0.000	0.0

**Nota:** Valores de las resistencias adicionales, la tensión de la red eléctrica y los valores de *standby*. Los valores  $I_{sb}$ ,  $V_{sb}$  y  $P_{sb}$  para la sección Izquierda se corresponden con los valores de consumo propio de los componentes electrónicos del Tomacorriente Inteligente.

Con base a los resultados anteriores, se realiza el modelo matemático aproximado del Circuito de prueba y de las variables eléctricas, agregando las resistencias adicionales. Para las

siguientes ecuaciones, tener presente que el subíndice  $v$  puede ser  $a$  = valor mínimo,  $p$  = valor medio, o  $b$  = valor máximo:

El valor de la resistencia  $R_L$ , dependiente de la cantidad de resistores  $n$  conectados, se determina a partir de la tolerancia de fabrica de los resistores la cual es del 5 %. Por lo tanto, el valor mínimo  $R_{La}$ , medio  $R_{Lp}$  y máximo  $R_{Lb}$  son:

$$R_{La}(n) = R_{Lp}(n) - (0,05 \cdot R_{Lp}(n)),$$

$$R_{Lp}(n) = \frac{1}{\frac{1}{820} \cdot n},$$

$$R_{Lb}(n) = R_{Lp}(n) + (0,05 \cdot R_{Lp}(n)),$$

para las resistencias adicionales  $R_A$ ,  $R_P$ ,  $R_F$  y  $R_N$  se toman los respectivos valores de la Tabla

16. Entre tanto para el calculo de los 3 valores aproximados  $R_{Tv}$  se obtienen según

$$R_{Tv}(R_{Lv}) = R_{Av} + R_{Pv} + R_{Fv} + R_{Nv} + R_{Lv}. \quad (30)$$

Para el valor  $V_S$  de la tensión de la red eléctrica, con base a los datos obtenidos en la Tabla 16, se establece una tolerancia de  $\pm 1.50\%$  ( $\pm 1.8$  V). Por lo tanto, los valores aproximados  $V_{Sv}$  de la tensión de la la red eléctrica son:

$$V_{Sa} = V_S - 1,8 \text{ V} = 118,2 \text{ V},$$

$$V_{Sp} = V_S = 120,0 \text{ V},$$



$$V_{Sb} = V_S + 1,8 \text{ V} = 121,8 \text{ V}$$

A partir de los valores  $V_{Sv}$  y  $R_{Tv}$  según cada configuración, se calcula los valores aproximados de la intensidad total de la corriente  $I_{TIv}$  que circula por el Circuito de prueba (y la cual es medida por el medidor del Tomacorriente Inteligente)

$$I_{TIv} = \frac{V_{Sv}}{R_{Tv}} \quad (31)$$

y de la potencia entregada por la red eléctrica  $P_{TIv}$

$$P_{Tv} = V_{Sv} \cdot I_{TIv} \quad (32)$$

Para determinar los valores aproximados mínimo  $a$ , medio  $p$  y máximo  $b$  de la tensión  $V_{TIv}$  y la potencia eléctrica  $P_{TIv}$  medibles por el Tomacorriente Inteligente, y la tensión medible  $V_{Lv}$  y la potencia disipada calculada  $P_{Lv}$  a partir de multímetro, se calculan primeramente los valores aproximados de las caídas de tensión  $V_{Av}$ ,  $V_{Pv}$ ,  $V_{Fv}$  y  $V_{Nv}$  y las potencias disipadas  $P_{Av}$ ,  $P_{Pv}$ ,  $P_{Fv}$  y  $P_{Nv}$  que se dan en cada una de las resistencias adicionales siguiendo las siguiente ecuaciones, donde  $X$  es el subíndice de la respectiva resistencia:

$$V_{Xv} = I_{TIv} \cdot R_{Xv} \quad (33)$$

$$P_{Xv} = (I_{TIv})^2 \cdot R_{Xv} \quad (34)$$

Así, se obtienen los valores aproximados de  $V_{TIv}$

$$V_{TIv} = (V_{Sv} - V_{Av}) - V_{Pv} \quad (35)$$

y de  $P_{TIv}$

$$P_{TIv} = V_{TIv} \cdot I_{TIv} \quad (36)$$

Entre tanto, para los valores aproximados de  $V_{Lv}$

$$V_{Lv} = I_{TIv} \cdot R_{Lv} \quad (37)$$

y para  $P_{Lv}$

$$P_{Lv} = (I_{TIv})^2 \cdot R_{Lv} \quad (38)$$

Para el consumo eléctrico  $U_E$ , se aplica el método de calculo acumulativo horario mostrado en *Consumo Eléctrico*, multiplicando cada valor de la potencia total del Circuito de prueba  $P_T$ , dependiente de la resistencia total  $R_T$  del Circuito de prueba, por el tiempo  $t_p$ , en horas, que duran conectados los resistores

$$U_{Ev} = P_{Tv} \cdot t_p \quad (39)$$

donde  $P_T$  es igual a la potencia total entregada por la red eléctrica lo cual es igual a la sumatoria de las potencias disipadas por las cinco (5) resistencias equivalentes.

$$P_{Tv} = V_{Sv} \cdot I_{TIv} = P_{Av} + P_{Pv} + P_{Fv} + P_{Nv} + P_{Lv} \quad (40)$$

Finalmente, siguiendo lo expuesto en el apartado de la Estadística comparativa de *Validación Experimental y Análisis de Información*, se calculan los errores relativos porcentuales  $E_{RPv}$ , los cuales determinan las tolerancias de referencia con respecto al modelo ideal, entre los respectivos tres valores aproximados de:

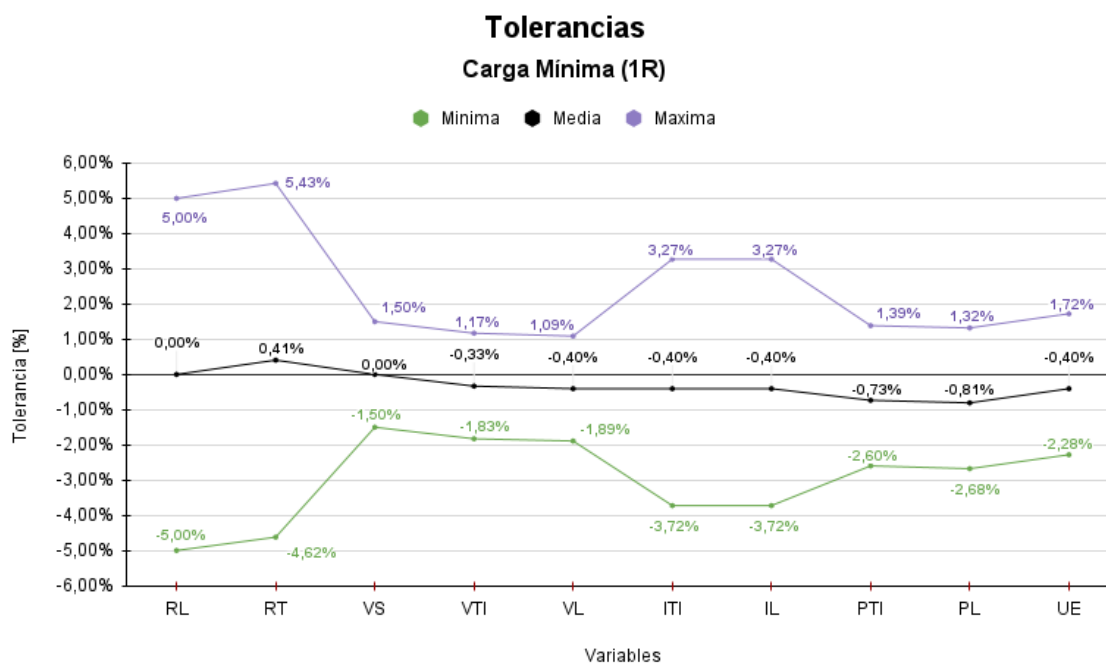
- $R_{Tv}$  y el valor ideal  $R_T(n)$  según la configuración de los resistores.
- $V_{Tlv}$  y el valor ideal  $V_T$ .
- $V_{Lv}$  y el valor ideal  $V_T$ .
- $I_{Tlv}$  y el valor ideal  $I_T$  según la configuración de los resistores.
- $P_{Tlv}$  (la cual es igual a  $P_{Tv}$ ) y el valor ideal  $P_T(R_T)$  según la configuración de los resistores.
- $P_{Lv}$  y el valor ideal  $P_T$  según la configuración de los resistores.
- $U_{Ev}$  y el valor ideal  $U_E$  según la configuración de los resistores.

A partir de los anteriores resultados, se establecen las tolerancias de referencia aceptadas para las mediciones y cálculos de las variables eléctricas frente al modelo ideal, lo anterior con el fin de que los análisis estadísticos tengan una mayor confiabilidad y se reduzcan los errores sistemáticos y estadísticos. Los resultados numéricos consolidados del modelo matemático aproximado se muestran en el producto de Resultados de la Evaluación del Anexo 1. Entre tanto, en las figuras 47, 49 y 51 se muestran las tolerancias aproximadas especificadas para las tres configuraciones para las pruebas de la validación experimental del prototipo.

En la Figura 47 se evidencia que para la configuración de 1 resistor, la tolerancia de  $R_T$  es muy próxima a la tolerancia de fábrica de los resistores ( $R_L$ ). Sin embargo, aunque se mantiene

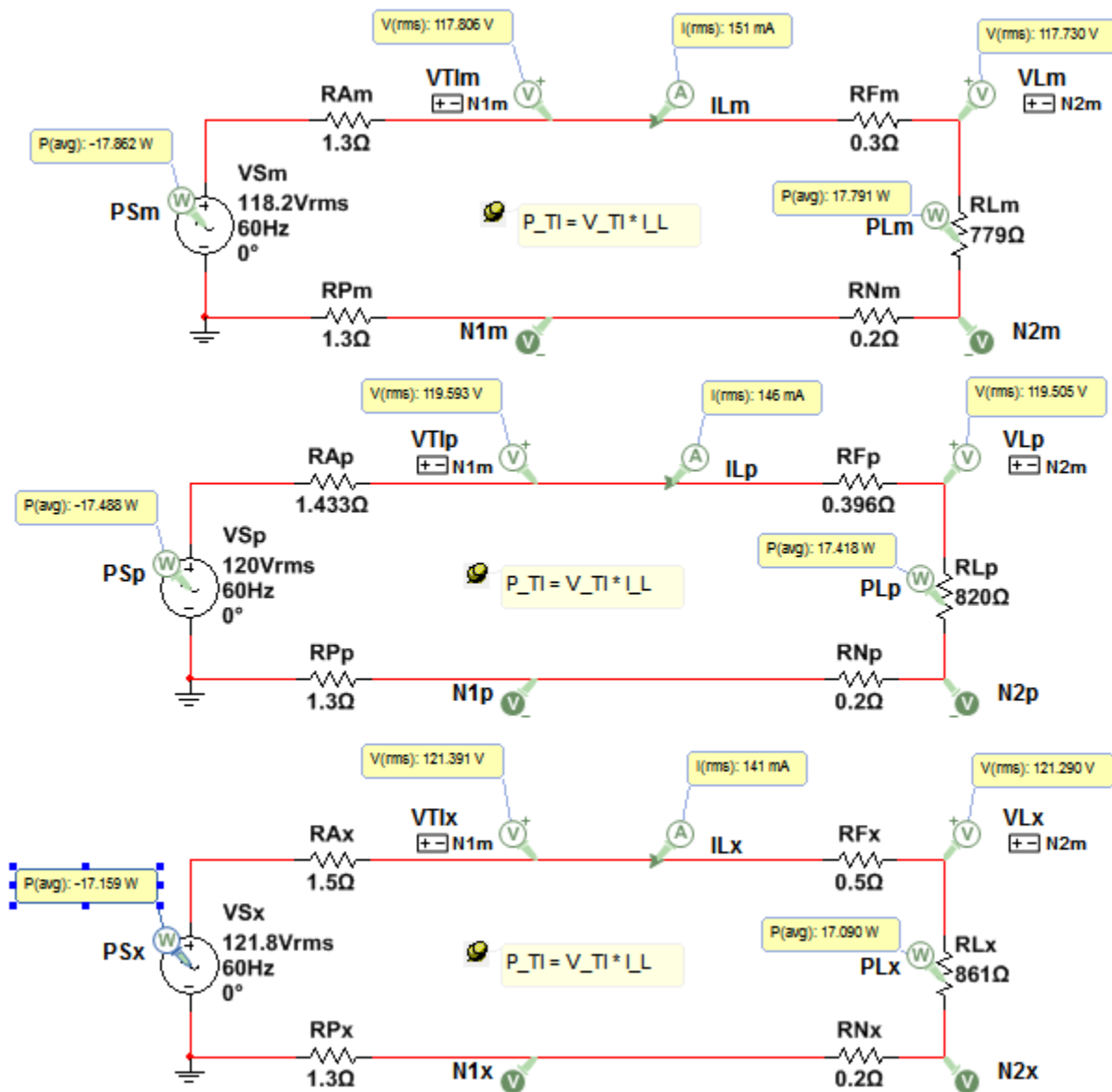
aproximadamente el rango absoluto de tolerancia del 10 %, debido a las resistencias adicionales, los valores mínimo, medio y máximo tienen un corrimiento frente a los valores de las tolerancias de fabrica. Situación parecida ocurre para las tensiones, las potencias y el consumo. Se mantiene aproximadamente el rango absoluto de tolerancia del 3 % para tensión y 4 % para potencia y consumo, pero se presenta un corrimiento de los valores. Finalmente, para la configuración de 1 resistor, todas las variables presentan valores de tolerancia por encima y por debajo de la tolerancia 0 %, por lo que se espera que las mediciones de las variables especificadas se encuentren por encima o por debajo de los respectivos valores ideales. Lo anterior se comprueba mediante la respectiva simulación aplicando la tolerancia especificada para la red eléctrica y para las resistencias adicionales (Fig. 48).

**Figura 47**  
*Tolerancias Aproximadas para 1 Resistor*



**Nota:** Tolerancias establecidas según el modelo matemático aproximado para la configuración de 1 resistor

**Figura 48**  
*Simulación del Modelo Aproximado para 1 resistor*

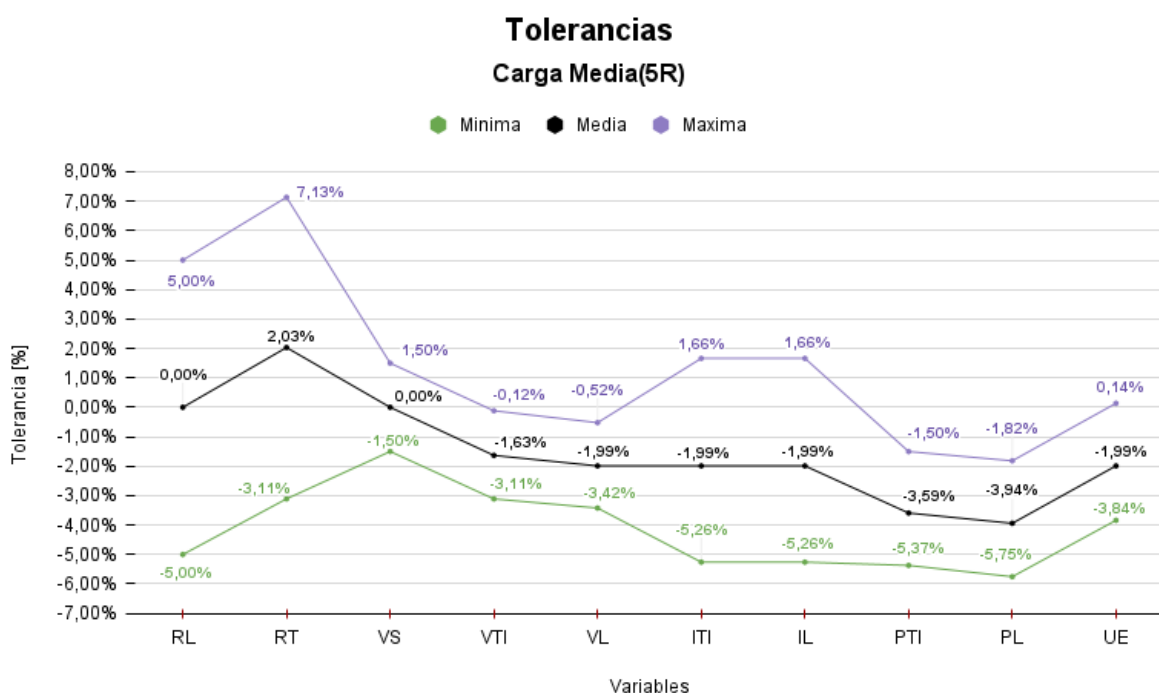


**Nota:** Arriba, con tolerancia mínima. Medio, con tolerancia media. Abajo, con tolerancia máxima.

Para la configuración de 5 resistores (Fig. 49), se mantiene el comportamiento descrito anteriormente del corrimiento de los valores mínimo, medio y máximo de las tolerancias debido a las resistencias adicionales y al aumento de la resistencia total. Nótese que la tolerancia de la resistencia total se corre hacia valores positivos mientras que para las demás variables se corre

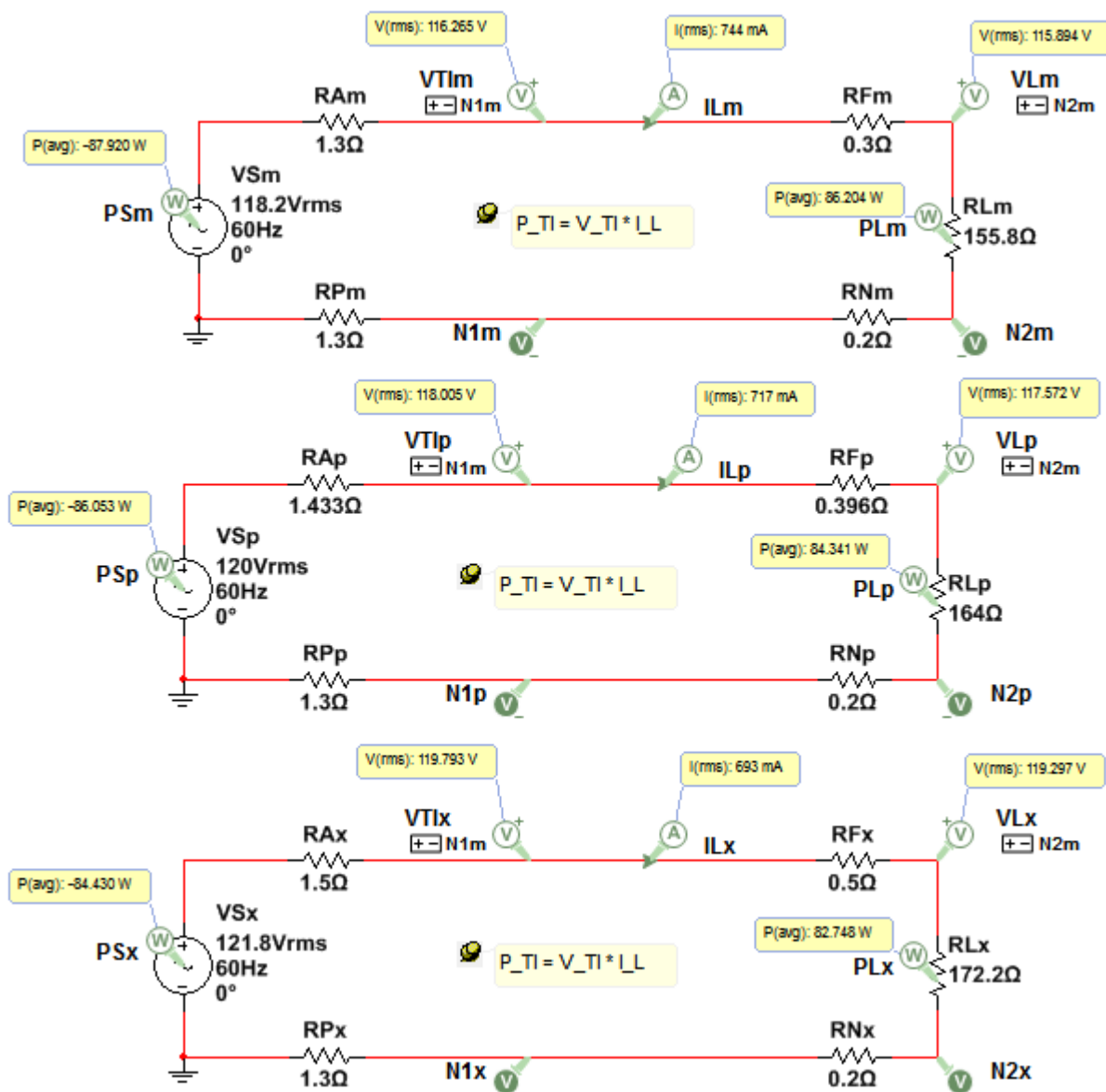
hacia valores negativos. Es importante tener en cuenta que los valores de tolerancia para las variables  $V_{TI}$ ,  $V_L$ ,  $P_{TI}$  y  $P_L$  son negativos debido al aumento de la resistencia total lo cual aumenta la caída de tensión en el Circuito de prueba y la disminución de la máxima potencia que la Carga de prueba puede demandar. En otras palabras, para las anteriores cuatro variables, se espera que en las mediciones no se obtenga el valor ideal respectivo. Lo anterior se comprueba mediante la respectiva simulación aplicando la tolerancia especificada para la red eléctrica y para las resistencias adicionales (Fig. 50).

**Figura 49**  
*Tolerancias Aproximadas para 5 Resistores*



**Nota:** Tolerancias establecidas según el modelo matemático aproximado para la configuración de 5 resistores

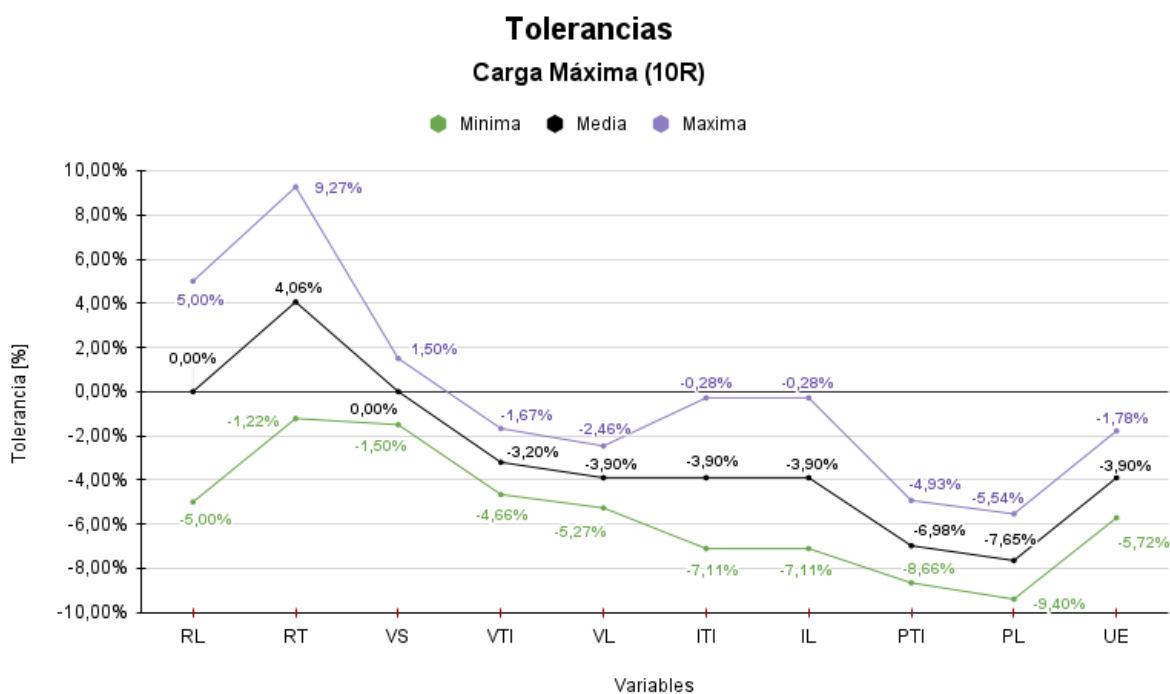
**Figura 50**  
*Simulación del Modelo Aproximado para 5 resistores*



**Nota:** Arriba, con tolerancia mínima. Medio, con tolerancia media. Abajo, con tolerancia máxima.

Para la configuración de 10 resistores (Fig. 51), se mantiene el comportamiento descrito anteriormente del corrimiento de los valores mínimo, medio y máximo de las tolerancias debido a las resistencias adicionales y al aumento de la resistencia total. Sin embargo, todas las tolerancias (con excepción de las variables de resistencia y de la tensión de la red eléctrica), son de valores negativos. Esto se traduce en que los valores de las mediciones para la prueba de carga máxima espera que siempre se encuentren por debajo de los valores ideales. Lo anterior se comprueba mediante la respectiva simulación aplicando la tolerancia especificada para la red eléctrica y para las resistencias adicionales (Fig. 52).

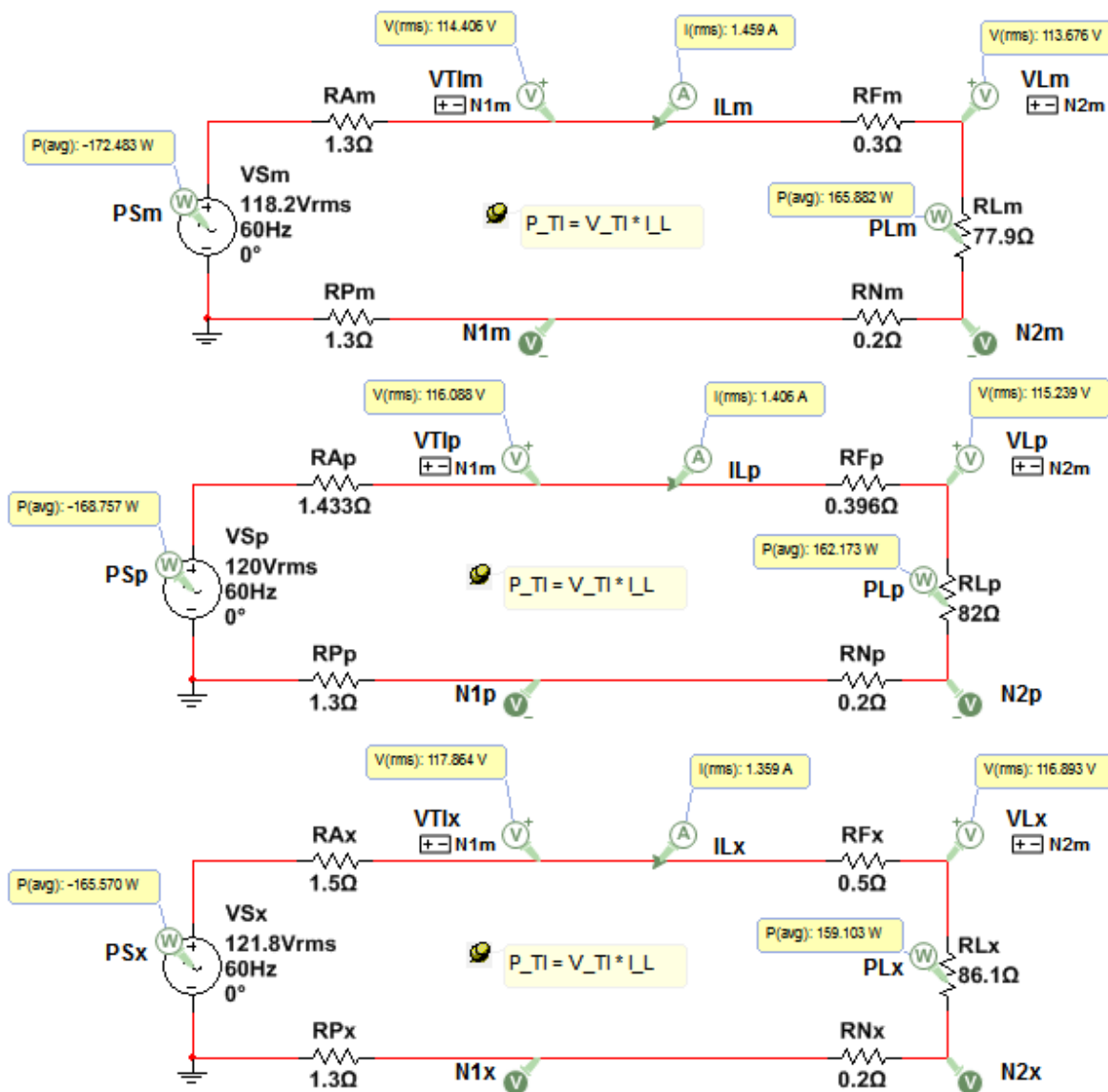
**Figura 51**  
*Tolerancias Aproximadas para 10 Resistores*



**Nota:** Tolerancias establecidas según el modelo matemático aproximado para la configuración de 10 resistores



**Figura 52**  
*Simulación del Modelo Aproximado para 10 Resistores*



**Nota:** Simulación del Modelo Aproximado para 10 resistores. Arriba, con tolerancia mínima. Medio, con tolerancia media. Abajo, con tolerancia máxima.

En el análisis de las tolerancias para las diez (10) posibles configuraciones de los resistores del Circuito de prueba, a pesar de que los valores porcentuales son diferentes para cada configuración (dependiendo de la cantidad de resistores conectados), se encontró que los rangos de las tolerancias cumplen una relación constante o lineal como se especifica en la Tabla 17.

**Tabla 17**  
*Rango de las tolerancias*

Variable	Símbolo	Tolerancia	Notas
Resistencia de Carga	$R_L$	$\pm 5 \%$	Tolerancia estándar de los resistores
Resistencia Total	$R_T$	+ 0.0488 %	Por cada resistor adicional, el rango de las tolerancias aumenta aproximadamente en este valor con un rango inicial de 10.0488 % para 1 resistor, y final de 10.4878 % para 10 resistores.
Tensión de la Red Eléctrica	$V_S$	$\pm 1.50 \%$	Tolerancia fija establecida. Variación entre 118.2 V y 121.8 V
Tensión medida por el Tomacorriente Inteligente	$V_{TI}$	3.00 %	Aproximadamente el rango de tolerancia para las 10 configuraciones es del 3 %.
Tensión medida en en la Carga	$V_L$	- 0.02 %	Por cada resistor adicional, el rango de las tolerancias disminuye aproximadamente en este valor con un rango inicial de 2.98 % para 1 resistor y final de 2.80 % para 10 resistores.
Intensidad de Corriente medida por el Tomacorriente Inteligente/del Circuito de Carga	$I_{IT} = I_L$	- 0.0192 %	Por cada resistor adicional, el rango de las tolerancias disminuye aproximadamente en este valor con un rango inicial de 6.9979 % para 1 resistor y final de 6.8254 % para 10 resistores.
Potencia calculada por el Tomacorriente Inteligente	$P_{IT}$	- 0.0281 %	Por cada resistor adicional, el rango de las tolerancias disminuye aproximadamente en este valor con un rango inicial de 3.9830 % para 1 resistor y final de 3.7299 % para 10 resistores.
Potencia calculada en la Carga	$P_L$	- 0.0152 %	Por cada resistor adicional, el rango de las tolerancias disminuye aproximadamente en este valor con un rango inicial de 3.9971 % para 1 resistor y final de 3.8602 % para 10 resistores

**Nota:** Se presenta los rangos de tolerancias esperados para las diferentes variables eléctricas

A partir de los resultados de la Tabla 17, se observa, como comportamiento general, que a mayor cantidad de resistores, menor será el rango de tolerancia aceptada para las variables de tensión, corriente y potencia. Inversamente, será mayor el rango de tolerancia para la resistencia total del circuito. Por último, con los anteriores análisis de las tolerancias, se puede concluir que

- Los resistores de la Carga de prueba mantienen su tolerancia de fabrica de  $\pm 5\%$  sin importar la cantidad de resistores conectados.
- A medida que aumenta la cantidad de resistores, la tolerancia de la resistencia total  $R_T$  tiene un corrimiento hacia valores positivos, sin embargo, manteniendo aproximadamente el rango absoluto de tolerancia del  $10\%$ . Los límites aceptados de variación para  $R_T$  se determinan en  $-4.62\%$  y  $9.27\%$  del valor ideal.
- La tolerancia para la tensión de la red eléctrica  $V_S$  se mantiene constante en  $\pm 1.50\%$  debido a que no depende del Circuito de prueba
- Para las demás variables, a medida que aumenta la cantidad de resistores, las tolerancias tendrán un corrimiento hacia valores negativos, es decir, los valores de las mediciones tenderán a disminuir con respecto al valor ideal respectivo a medida que se aumenta la resistencia total.
- Los límites para  $V_{TI}$  se determinan en  $-4.66\%$  y  $1.17\%$  y para  $V_L$  entre  $-5.27\%$  y  $1.09\%$ .
- Los límites para  $I_{TI}$  e  $I_L$  se determinan en  $-7.11\%$  y  $3.27\%$ .
- Los límites para  $V_{TI}$  se determinan en  $-8.66\%$  y  $-1.39\%$  y para  $V_L$  en  $-9.40\%$  y  $1.32\%$
- Los límites para  $U_E$  se determinan en  $-5.72\%$  y  $1.72\%$

## Implementación

Posterior a la evaluación del prototipo del sistema de telegestión IoT en un entorno controlado con el Circuito de prueba, se realiza la implementación del prototipo en una aplicación real, para este caso en una instalación residencial, durante treinta y un (31) días. Gracias a que el Tomacorriente Inteligente es doble, se pueden conectar una diversidad de aparatos eléctricos en simultáneo. En la Tabla 18 se muestra los aparatos y equipo conectados durante la prueba de la implementación. Se resalta que la corriente y potencia especificadas en la Tabla 18 es la especificada por los aparatos eléctricos, empero, dependiendo de su uso (Ej. según la intensidad luminosa configurada para la pantalla de televisión o el volumen del amplificador de sonido) podrán demandar una corriente menor, y por consiguiente, una potencia menor. En la Figura 53 se evidencia la implementación del prototipo.

**Tabla 18**

*Aparatos Eléctricos para la Implementación*

<b>Aparato</b>	<b>Corriente máxima [A]</b>	<b>Potencia máxima [W]</b>
Pantalla de televisor	1.20	144
Amplificador de sonido	0.25	30
Cautín	0.30	40
Cautín	0.21	25
Cargador de 12 V	1.50	18
AP/Gateway de Perímetro (USB 5 V)	0.50	2.5
Cable de Carga USB (5 V)	2.00	10

**Nota:** Se listan los aparatos eléctricos usados en la implementación del prototipo

**Figura 53**  
*Implementación del prototipo*



**Nota:** La caja negra grande se corresponde con el Tomacorriente Inteligente, en la cual resalta los 2 LEDs de visualización. La caja negra pequeña conectada a través del cable USB es el AP/Gateway de Perímetro. Se evidencia una de las principales ventajas del Tomacorriente Inteligente de habilitar la conexión de 2 aparatos en simultaneo (4 si se cuenta los 2 puertos USB del tomacorriente).

El objetivo de la implementación es evaluar, a través de la plataforma IoT, la aplicación móvil y la información recolectada por los Archivos de Información, el comportamiento del prototipo desarrollado en aplicaciones reales conectando diferentes aparatos, equipos y dispositivos que se pueden encontrar en las instalaciones BT-UG.

## **Resultados**

### **Etapa de Evaluación**

Se procedió a realizar las tres pruebas de validación experimental por cada sección del Tomacorriente Inteligente y con un multímetro UNI-T UT58B, obteniendo un registro de datos y una información procesada los cuales se almacenaron en los respectivos Archivos de Información (Ver Resultados de la Evaluación en el Anexo 1).

Posterior a su almacenamiento y depuración, se aplicaron las diferentes técnicas estadísticas para obtener los cuatro análisis planteados en los *Parámetros de Evaluación*. Estos resultados se obtuvieron de forma semi automatizada gracias a las tablas y formulación generada por el servicio de Nube de los archivos de información (Google Sheets) y a la generación de gráficas a través de *scripts* para el procesamiento de datos (Phyton Matplotlib). El usuario se limita a verificar que la información generada se corresponda con los datos registrados y al mejoramiento de la forma de presentación de las tablas y las gráficas.

Para referencia y entendimiento de los siguientes análisis, se debe conocer que la resolución de tensión del Tomacorriente Inteligente es de 0.1 V, de corriente es de 0.001 A, de potencia es de 0.1 W y de consumo eléctrico de 1 Wh.

### *Mediciones iniciales y finales*

Los primeros resultados que se obtuvieron fueron las Estadísticas Descriptivas de las mediciones iniciales y finales de las resistencias y de la tensión de la red eléctrica (Tab. 16), valores usados para determinar las tolerancias establecidas en el modelo matemático aproximado.

Para cada una de las cuatro (4) resistencias adicionales y para los valores *standby* de tensión, corriente y potencia, se obtuvieron veinticuatro (24) muestras por cada variable, las cuales no presentan una variación significativa (con excepción de la tensión) como se muestra en los valores presentados en la Tabla 16.

Entre tanto para la resistencia total del Circuito de prueba, se realizaron dos (2) mediciones: una antes de comenzar la prueba, y otra al final. Los resultados obtenidos para las tres configuraciones se muestran en la Tabla 19 en la cual se evidencia que la variación de la resistencia total fue mínima, aunque presentándose de forma general un ligero aumento de su valor, aumento que se atribuye al aumento de temperatura de los resistores debido a la disipación de potencia. No obstante, la mínima variación de la resistencia demuestra la eficiencia del sistema de refrigeración implementado el cual minimizó el impacto de la temperatura en el comportamiento eléctrico del Circuito de prueba.

**Tabla 19***Mediciones de la Resistencia total*

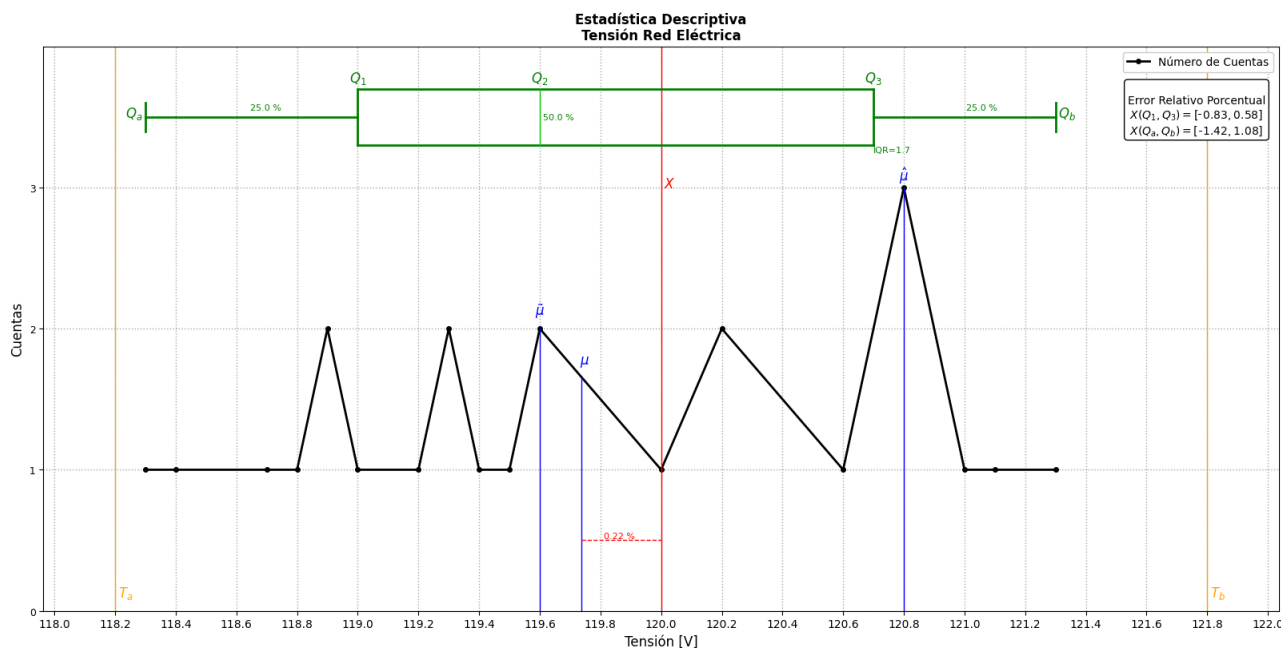
<b>Cant. resistores</b>	<b>Sección</b>	<b>Ideal</b>	<b>Antes</b>	<b>Después</b>	<b>ERP [ %]</b>
1	Izq.	820	829.0	832.0	0.36
	Der.		829.0	834.0	0.60
5	Izq.	164	165.8	166.3	0.30
	Der.		166.3	166.7	0.24
10	Izq.	82	83.1	83.4	0.36
	Der.		83.2	83.7	0.60

**Nota:** Se presentan los resultados de las mediciones iniciales y finales de la resistencia total del Circuito de prueba

En cuanto a las mediciones obtenidas de la tensión  $V_S$  de la red eléctrica, los resultados de la estadística descriptiva se muestran en la Figura 54. Se evidencia lo planteado anteriormente sobre la variación que presenta la tensión de la red eléctrica. Para la validación experimental realizada, la variación fue entre aproximadamente entre el -1.42 % (118.3 V) y el 1.08 % (121.3 V) del valor nominal de 120 V con un promedio de 119.738 V (ERP 0.22 %). No obstante, el 50 % de las mediciones se agruparon entorno a los valores de 119.0 V (ERP -0.83 %) y 121.7 V (ERP 0.58 %). A partir de lo anterior, se estableció la tolerancia de  $\pm 1.5$  % para la tensión de la red eléctrica. Es importante este análisis porque demuestra, contrario a lo que se evidenció en varios de los Antecedentes revisados, que el valor de la tensión eléctrica no se debe tomar como constante (al valor nominal) sino se debe implementar un medidor eléctrico que pueda sensor las variaciones que se producen en la red eléctrica para así aumentar la exactitud del calculo del consumo eléctrico.



**Figura 54**  
*Estadística descriptiva de la Tensión de la red eléctrica*



**Nota:** En negro, el número de cuentas obtenido por cada valor único de tensión. En rojo, el valor ideal de de 120 V. En amarillo, los valores de tolerancia establecidos. En azul, los estadísticos de tendencia central. En verde, los estadísticos de posición. Nótese la variación entre el -1.42 % y el 1.08 % frente al valor ideal del conjunto de mediciones obtenidas.

### *Estadística Descriptiva*

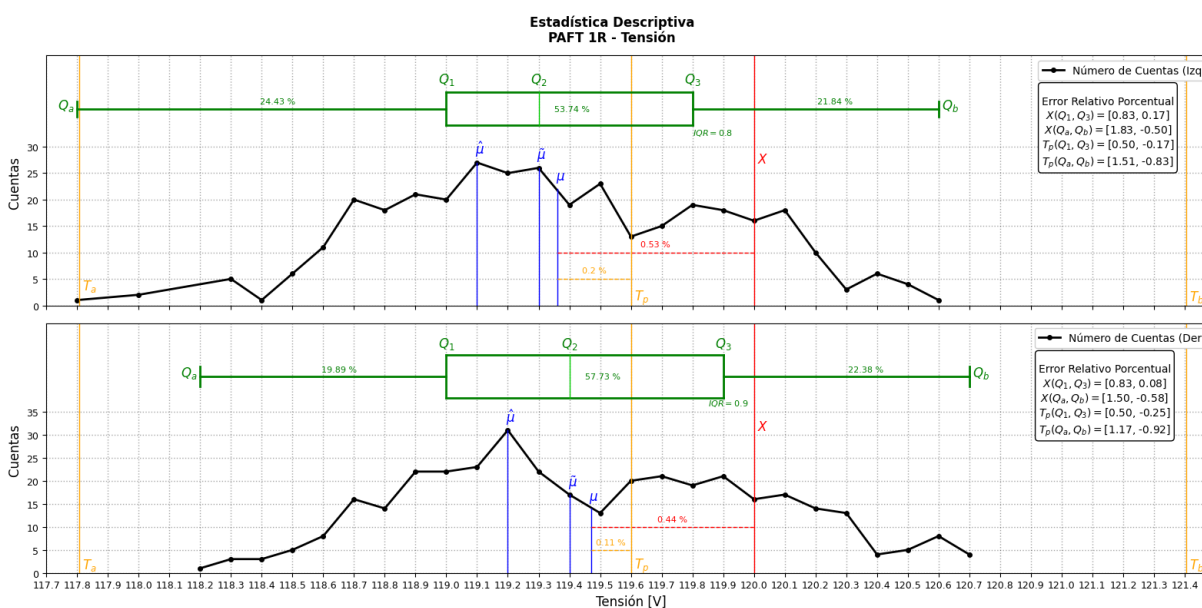
Los resultados de las Estadísticas Descriptivas de las mediciones entregadas por el Tomacorriente Inteligente se muestran para las variables de tensión, corriente y potencia respectivamente en las figuras 55, 56 y 57 para la prueba de carga mínima (1 resistor), en las figuras 58, 59 y 60 para la prueba de carga media (5 resistores), y en las figuras 61, 62 y 63 para la prueba de carga máxima (10 resistores). Para el consumo eléctrico, debido a ser acumulativo, no se generan estadísticas descriptivas.

Se aclara que los ERP presentados en cada figura determinan el valor medio, el rango y el IQR de la veracidad del conjunto de mediciones, de la respectiva variable, frente al valor ideal  $X$  y frente al valor medio de la tolerancia establecida  $T_P$ . Es importante notar que, en este proyecto,

$X$  es un valor teórico de referencia mas no el esperado debido a las cuestiones planteadas en el modelo matemático aproximado. Es  $T_P$  el que prácticamente se espera obtener por lo que para determinar la exactitud de las mediciones se debe realizar con respecto a este valor y no al ideal.

En la Figura 55 se muestra que, para la configuración de carga mínima, la tensión medible  $V_{TI}$  para la sección Izquierda fue en promedio 119.361 V con un rango de 2.8 V y un IQR de 0.8 V el cual agrupa al 53.74 % de las cuentas. Para la sección Derecha, fue en promedio 119.470 V con un rango de 2.5 V, y un IQR de 0.9 V el cual agrupa el 53.73 % de las cuentas.

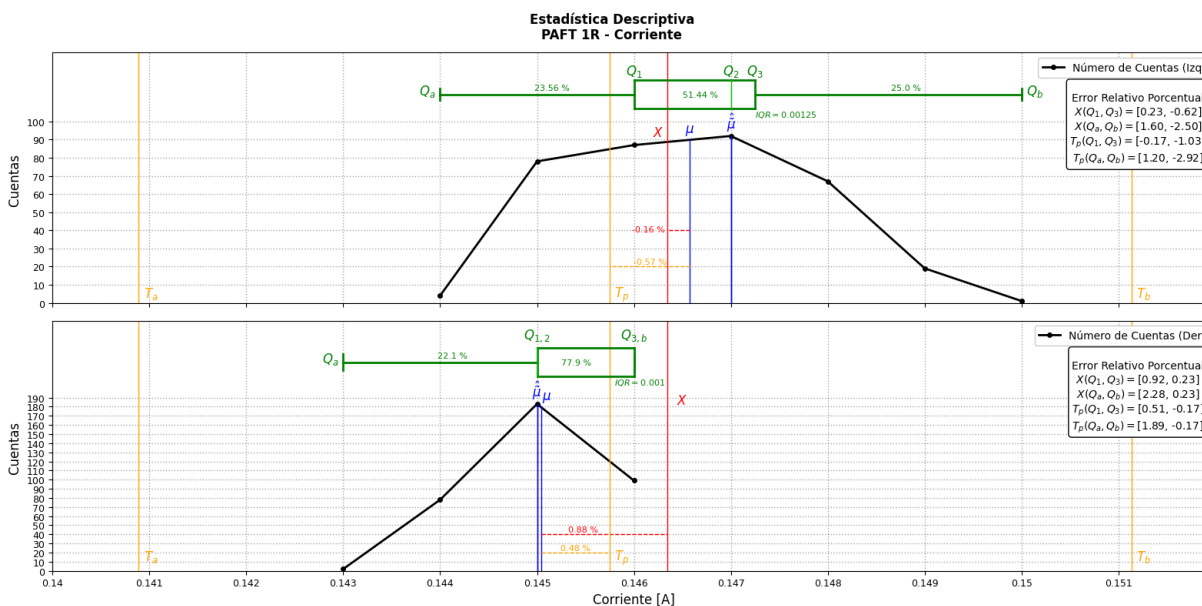
**Figura 55**  
*Estadística descriptiva de Tensión para 1 resistor*



**Nota:** En Negro, el número de cuentas obtenidas por cada valor único. En rojo, el valor ideal y el ERP frente al promedio. En amarillo, los valores de la tolerancia establecida y el ERP frente al promedio. En Azul, los estadísticos de tendencia central (promedio, mediana y moda). En Verde, la gráfica *boxplot* con los estadísticos de posición por cuartiles, rango, IQR y % de distribución de las cuentas. En la Tabla, ERP del valor esperado y del valor medio de la tolerancia frente al rango y al IQR.

En la Figura 56 se muestra que, para la configuración de carga mínima, la intensidad de corriente medible  $I_{TI}$  para la sección Izquierda fue en promedio 0.1466 A con un rango de 0.006 A y un IQR de 0.00125 A el cual agrupa al 51.44 % de las cuentas. Para la sección Derecha, fue en promedio 0.14505 A con un rango de 0.003 y un IQR de 0.001 A el cual agrupa el 77.90 % de las cuentas. Una situación especial, en este caso, para ambas secciones la mediana y la moda se corresponden al mismo valor el cual se encuentra próximo al valor del promedio. Lo anterior, sumado a los pequeños rangos e IQR obtenidos, se traduce en una baja dispersión y variación de las mediciones de corriente, lo cual significa una alta precisión debido a que los estadísticos de tendencia central se encuentran centralizados hacia el mismo valor.

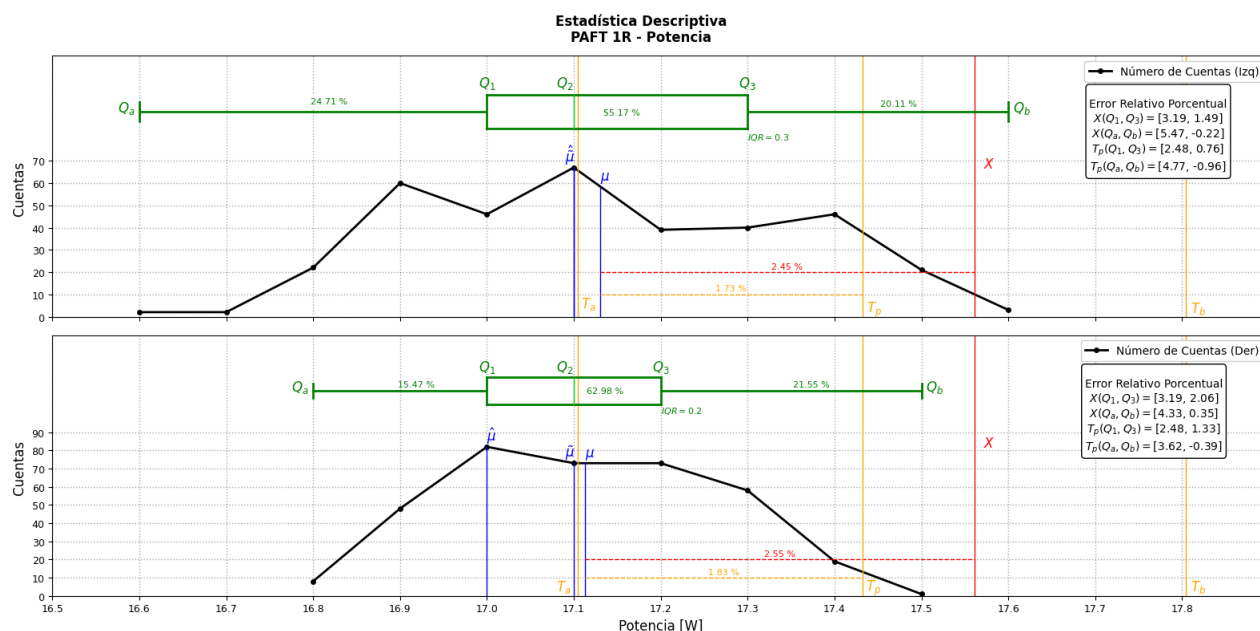
**Figura 56**  
*Estadística descriptiva de Corriente para 1 resistor*



**Nota:** En Negro, el número de cuentas obtenidas por cada valor único. En rojo, el valor ideal y el ERP frente al promedio. En amarillo, los valores de la tolerancia establecida y el ERP frente al promedio. En Azul, los estadísticos de tendencia central (promedio, mediana y moda). En Verde, la gráfica *boxplot* con los estadísticos de posición por cuartiles, rango, IQR y % de distribución de las cuentas. En la Tabla, ERP del valor esperado y del valor medio de la tolerancia frente al rango y al IQR.

En la Figura 57 se muestra que, para la configuración de carga mínima, la potencia medible  $P_{TI}$  para la sección Izquierda fue en promedio 17.130 W con un rango de 1 W y un IQR de 0.3 W el cual agrupa al 55.17 % de las cuentas. Para la sección Derecha, fue en promedio 17.113 W con un rango de 0.7 W y un IQR de 0.2 W el cual agrupa el 62.98 % de las cuentas.

**Figura 57**  
*Estadística descriptiva de Potencia para 1 resistor*



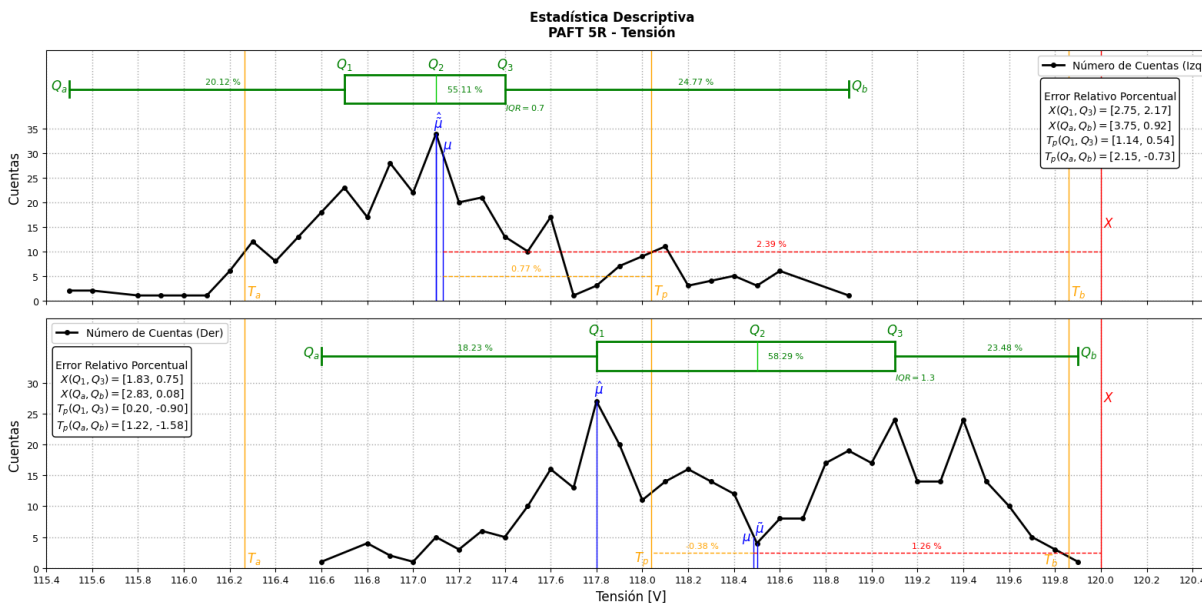
**Nota:** En Negro, el número de cuentas obtenidas por cada valor único. En rojo, el valor ideal y el ERP frente al promedio. En amarillo, los valores de la tolerancia establecida y el ERP frente al promedio. En Azul, los estadísticos de tendencia central (promedio, mediana y moda). En Verde, la gráfica *boxplot* con los estadísticos de posición por cuartiles, rango, IQR y % de distribución de las cuentas. En la Tabla, ERP del valor esperado y del valor medio de la tolerancia frente al rango y al IQR.

De forma general, para la configuración de carga mínima, el Tomacorriente Inteligente es confiable en su proceso de medición y calculo de las variables eléctricas, pues se obtuvieron estadísticas similares para las dos secciones del Tomacorriente Inteligente en las cuales los promedios representativos, por cada variable, son próximos entre si. Igualmente se determina una alta precisión de los medidores eléctricos del Tomacorriente Inteligente, lo cual se detalla en las

Distribuciones de Gauss, debido a que se obtuvieron rangos e IQR pequeños, lo cual significa una baja dispersión de las mediciones, para las tres variables. También el Tomacorriente Inteligente presenta una alta veracidad, pues los ERP promedio de las mediciones de tensión y corriente (la medición de potencia no se tiene en cuenta para determinar la veracidad debido a un error sistemático que se detalla mas adelante) no fueron mayor al 1 % con respecto al valor medio de la tolerancia e inclusive con frente al valor ideal y los conjuntos de mediciones se encontraron dentro de la tolerancia establecida. Por lo tanto, al existir una alta confiabilidad, precisión y veracidad, se concluye que el Tomacorriente Inteligente presenta una alta exactitud de medición para bajas intensidades de corriente.

En la Figura 58 se muestra que, para la configuración de carga media, la tensión medible  $V_{TI}$  para la sección Izquierda fue en promedio 117.129 V con un rango de 3.4 V y un IQR de 0.7 V el cual agrupa al 55.11 % de las cuentas. Para la sección Derecha, fue en promedio 118.484 V con un rango de 3.3 V, y un IQR de 1.3 V el cual agrupa el 58.29 % de las cuentas. Nótese que, como se planteó en el modelo matemático aproximado, al aumentar la cantidad total de resistores conectados en la Carga de prueba, se produce una caída de tensión, y por lo tanto, el valor de  $V_{TI}$  será menor que el de la tensión de la red eléctrica.

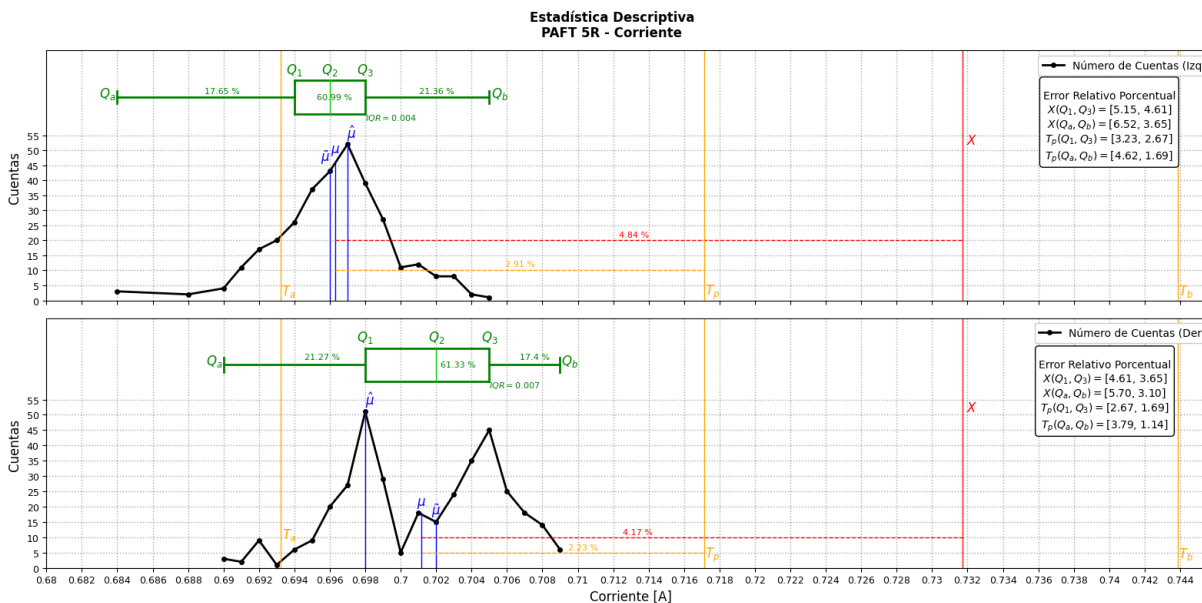
**Figura 58**  
*Estadística descriptiva de Tensión para 5 resistores*



**Nota:** En Negro, el número de cuentas obtenidas por cada valor único. En rojo, el valor ideal y el ERP frente al promedio. En amarillo, los valores de la tolerancia establecida y el ERP frente al promedio. En Azul, los estadísticos de tendencia central (promedio, mediana y moda). En Verde, la gráfica *boxplot* con los estadísticos de posición por cuartiles, rango, IQR y % de distribución de las cuentas. En la Tabla, ERP del valor esperado y del valor medio de la tolerancia frente al rango y al IQR.

En la Figura 59 se muestra que, para la configuración de carga media, la intensidad de corriente medible  $I_{TI}$  para la sección Izquierda fue en promedio 0.696 A con un rango de 0.021 A y un IQR de 0.004 A el cual agrupa al 60.99 % de las cuentas. Para la sección Derecha, fue en promedio 0.701 A con un rango de 0.019 A y un IQR de 0.007 A el cual agrupa el 61.33 % de las cuentas.

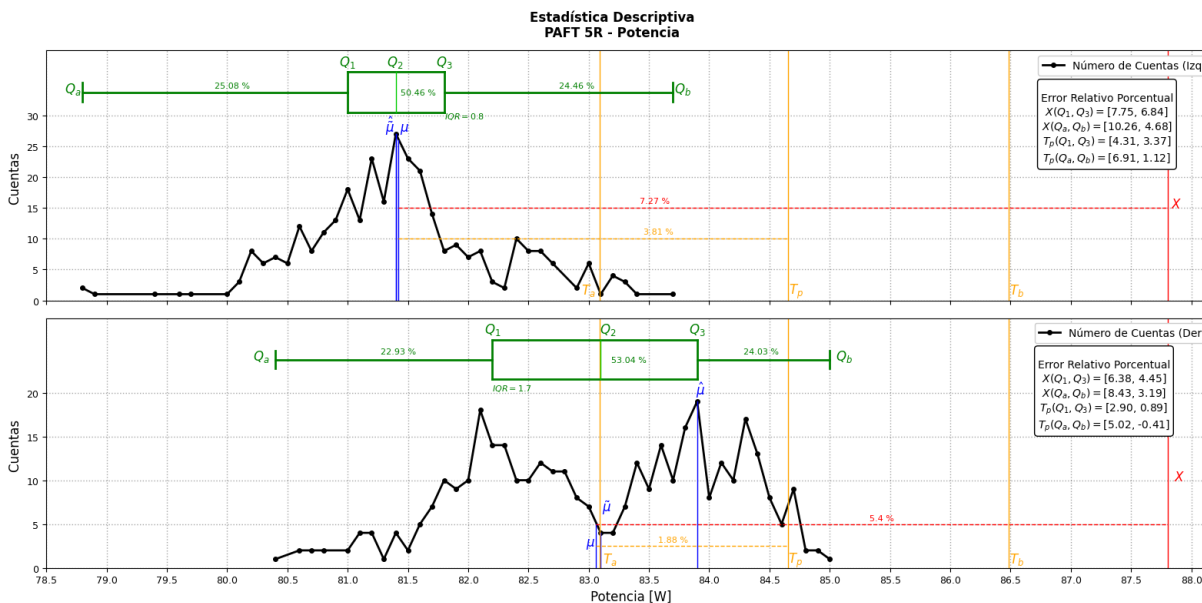
**Figura 59**  
*Estadística descriptiva de Corriente para 5 resistores*



**Nota:** En Negro, el número de cuentas obtenidas por cada valor único. En rojo, el valor ideal y el ERP frente al promedio. En amarillo, los valores de la tolerancia establecida y el ERP frente al promedio. En Azul, los estadísticos de tendencia central (promedio, mediana y moda). En Verde, la gráfica *boxplot* con los estadísticos de posición por cuartiles, rango, IQR y % de distribución de las cuentas. En la Tabla, ERP del valor esperado y del valor medio de la tolerancia frente al rango y al IQR.

En la Figura 60 se muestra que, para la configuración de carga media, la potencia medible  $P_{TI}$  para la sección Izquierda fue en promedio 81.423 W con un rango de 4.9 W y un IQR de 0.8 W el cual agrupa al 50.46 % de las cuentas. Para la sección Derecha, fue en promedio 83.062 W con un rango de 4.6 W y un IQR de 1.7 W el cual agrupa el 53.04 % de las cuentas.

**Figura 60**  
*Estadística descriptiva de Potencia para 5 resistores*



**Nota:** En Negro, el número de cuentas obtenidas por cada valor único. En rojo, el valor ideal y el ERP frente al promedio. En amarillo, los valores de la tolerancia establecida y el ERP frente al promedio. En Azul, los estadísticos de tendencia central (promedio, mediana y moda). En Verde, la gráfica *boxplot* con los estadísticos de posición por cuartiles, rango, IQR y % de distribución de las cuentas. En la Tabla, ERP del valor esperado y del valor medio de la tolerancia frente al rango y al IQR.

De forma general, para la configuración de carga media, el Tomacorriente Inteligente es confiable en su proceso de medición y cálculo de las variables eléctricas, aunque es importante notar que se marca una ligera diferencia entre las estadísticas obtenidas para una misma variable en las cuales los promedios representativos presentan un ligero error de aproximación entre ellos que no es representativo para la confiabilidad. Igualmente se determina una alta precisión de los medidores eléctricos del Tomacorriente Inteligente debido a que, a pesar de que los rangos fueron mas dispersos, se obtuvieron IQR pequeños, lo cual significa una baja dispersión de las mediciones centrales, para las tres variables. También el Tomacorriente Inteligente presenta una alta veracidad, pues los ERP promedio de las mediciones de tensión no fue mayor al 1 % y de

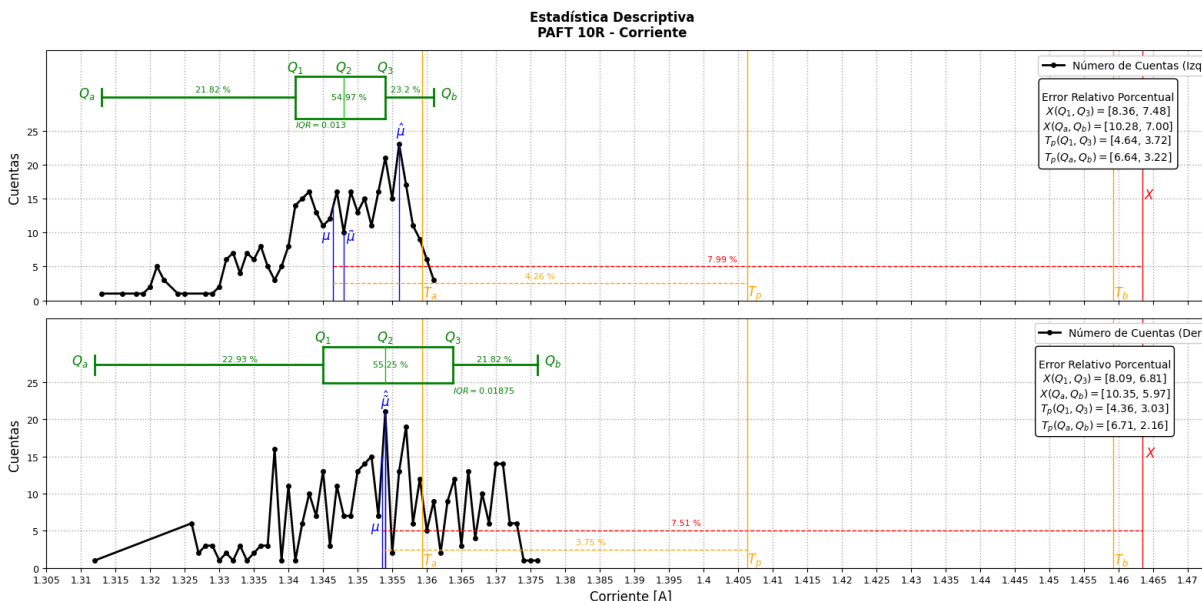


corriente no fue mayor al 3 % con respecto al valor medio de la tolerancia. Sin embargo, existieron mediciones por fuera de las tolerancias establecidas. Para cargas medias, si existe una confiabilidad, precisión y veracidad del Tomacorriente Inteligente pero se identifica la incidencia negativa de algún error sistemático que provocó valores únicos extremos (rango ampliado), una dispersión general mayor, ligeras diferencias entre las estadísticas para una misma variable y ERP mayores al 1 %. No obstante, se concluye que el Tomacorriente Inteligente presenta una exactitud aceptable de medición.

En la Figura 61 se muestra que, para la configuración de carga máxima, la tensión medible  $V_{TI}$  para la sección Izquierda fue en promedio 114.322 V con un rango de 3.4 V y un IQR de 0.6 V el cual agrupa al 55.52 % de las cuentas. Para la sección Derecha, fue en promedio 115.112 V con un rango de 4.5 V, y un IQR de 1.6 V el cual agrupa el 50.55 % de las cuentas. Notese la caída de tensión, de hasta 8 V con respecto al valor nominal de 120 V, que se presenta en la configuración de carga máxima.



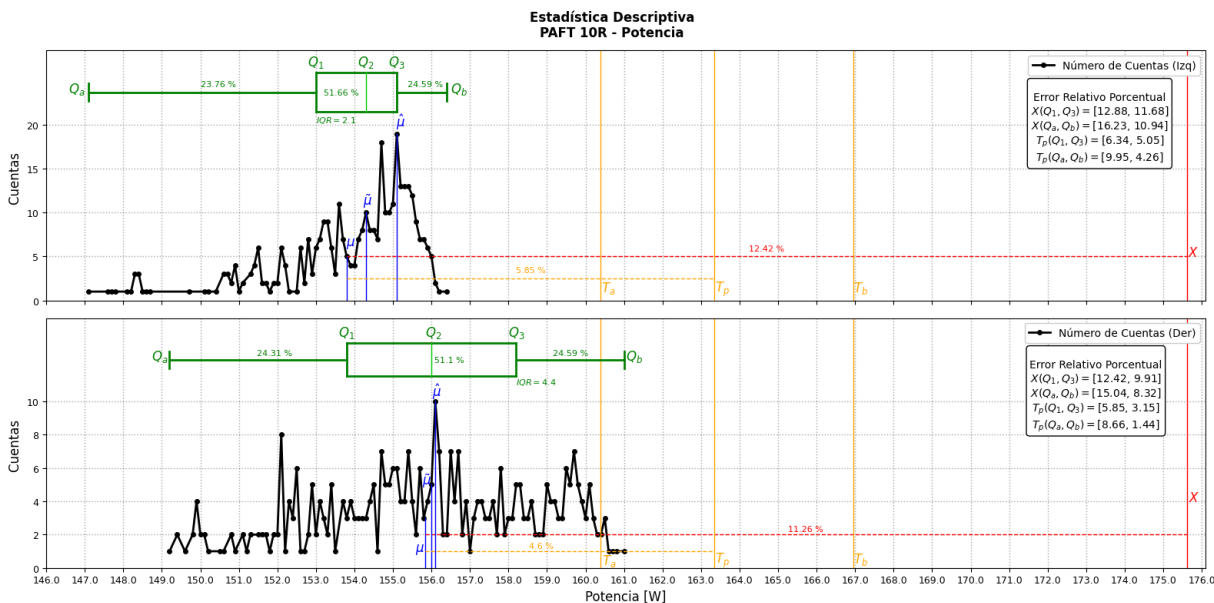
**Figura 62**  
*Estadística descriptiva de Corriente para 10 resistores*



**Nota:** En Negro, el número de cuentas obtenidas por cada valor único. En rojo, el valor ideal y el ERP frente al promedio. En amarillo, los valores de la tolerancia establecida y el ERP frente al promedio. En Azul, los estadísticos de tendencia central (promedio, mediana y moda). En Verde, la gráfica *boxplot* con los estadísticos de posición por cuartiles, rango, IQR y % de distribución de las cuentas. En la Tabla, ERP del valor esperado y del valor medio de la tolerancia frente al rango y al IQR.

En la Figura 63 se muestra que, para la configuración de carga máxima, la potencia medible  $P_{TI}$  para la sección Izquierda fue en promedio 153.802 W con un rango de 9.3 W y un IQR de 2.1 W el cual agrupa al 51.66 % de las cuentas. Para la sección Derecha, fue en promedio 155.840 W con un rango de 11.8 W y un IQR de 4.4 W el cual agrupa el 51.1 % de las cuentas.

**Figura 63**  
*Estadística descriptiva de Potencia para 10 resistores*



**Nota:** En Negro, el número de cuentas obtenidas por cada valor único. En rojo, el valor ideal y el ERP frente al promedio. En amarillo, los valores de la tolerancia establecida y el ERP frente al promedio. En Azul, los estadísticos de tendencia central (promedio, mediana y moda). En Verde, la gráfica *boxplot* con los estadísticos de posición por cuartiles, rango, IQR y % de distribución de las cuentas. En la Tabla, ERP del valor esperado y del valor medio de la tolerancia frente al rango y al IQR.

De forma general, para la configuración de carga máxima, el Tomacorriente Inteligente es confiable en su proceso de medición y cálculo de las variables eléctricas, pues las estadísticas obtenidas y los promedios representativos son próximos entre si para cada variable. Igualmente se determina una precisión aceptable de los medidores eléctricos del Tomacorriente Inteligente debido a que, a pesar de que los rangos fueron mas dispersos, se obtuvieron IQR pequeños, lo cual significa una baja dispersión de las mediciones centrales, para las tres variables. También el Tomacorriente Inteligente presenta una veracidad aceptable, pues los ERP promedio de las mediciones de tensión no fue mayor al 2 % y de corriente no fue mayor al 5 % con respecto al valor medio de la tolerancia. Sin embargo, la mayoría de las mediciones, para las tres variables, se

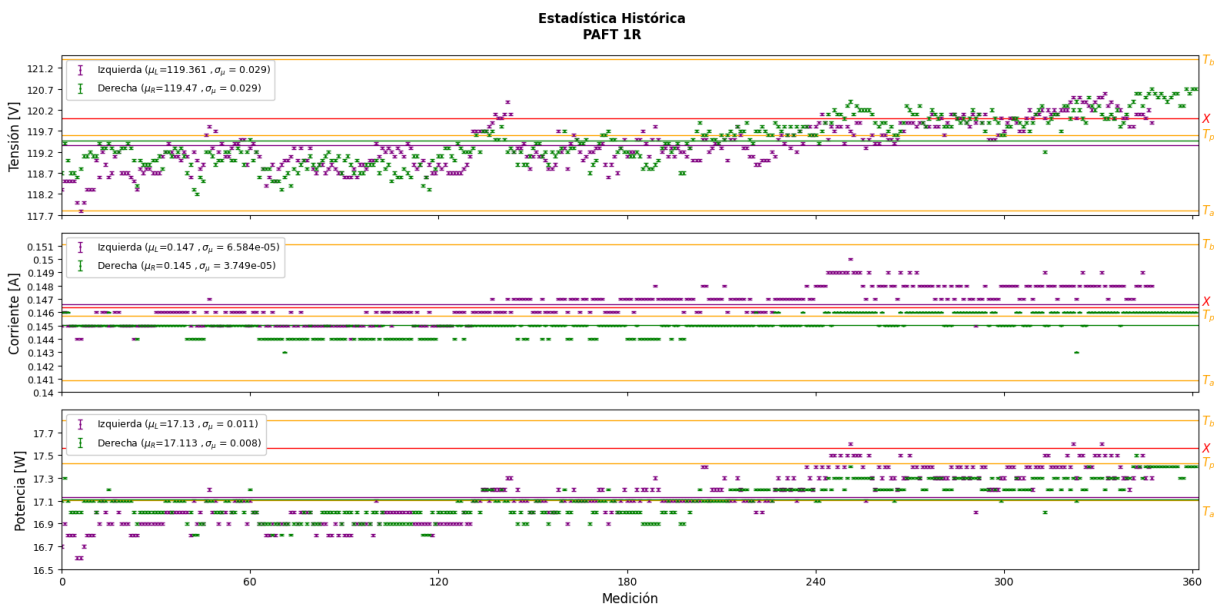
encontraron por fuera de las tolerancias establecidas. Se determina que, para intensidades de corriente mayores, si existe una confiabilidad, precisión y veracidad del Tomacorriente Inteligente pero se identifica la incidencia negativa de algún error sistemático que provocó rangos ampliados, una dispersión general mayor, ERP mayores al 1 % y mediciones por fuera de las tolerancias establecidas. Se concluye que el Tomacorriente Inteligente presenta una exactitud aceptable de medición aunque es importante la identificación de los errores sistemáticos para reducir su impacto en las mediciones y aumentar la exactitud general del Tomacorriente Inteligente.

### ***Estadística Histórica***

Los resultados de las Estadísticas Históricas de las mediciones entregadas por el Tomacorriente Inteligente se muestran en conjunto para las variables de tensión, corriente y potencia en la Figura 64 y para el consumo eléctrico en la Figura 65 para la prueba de carga mínima (1R), en las figuras 66 y 67 respectivamente para la prueba de carga media (5R) y en las figuras 68 y 69 respectivamente para la prueba de carga máxima (10R).

En la Figura 64 se presenta la evolución temporal de las mediciones de tensión, corriente y potencia para la configuración de carga mínima frente al valor ideal y la tolerancia establecida para cada variable. Se observa un inapreciable Error Estándar (representado por las barras de error de cada variable) pero si una dispersión significativa, que es mayor para la variable de tensión debido a la red eléctrica. No obstante, para corriente y potencia se aprecia intervalos de las mediciones con baja dispersión lo cual significa una alta precisión de las mediciones. A partir de estos resultados, se identifica que el rango amplio presentado en la estadística descriptiva para cada variable se debe a la tendencia creciente de las mediciones.

**Figura 64**  
*Estadística histórica para 1 resistor*

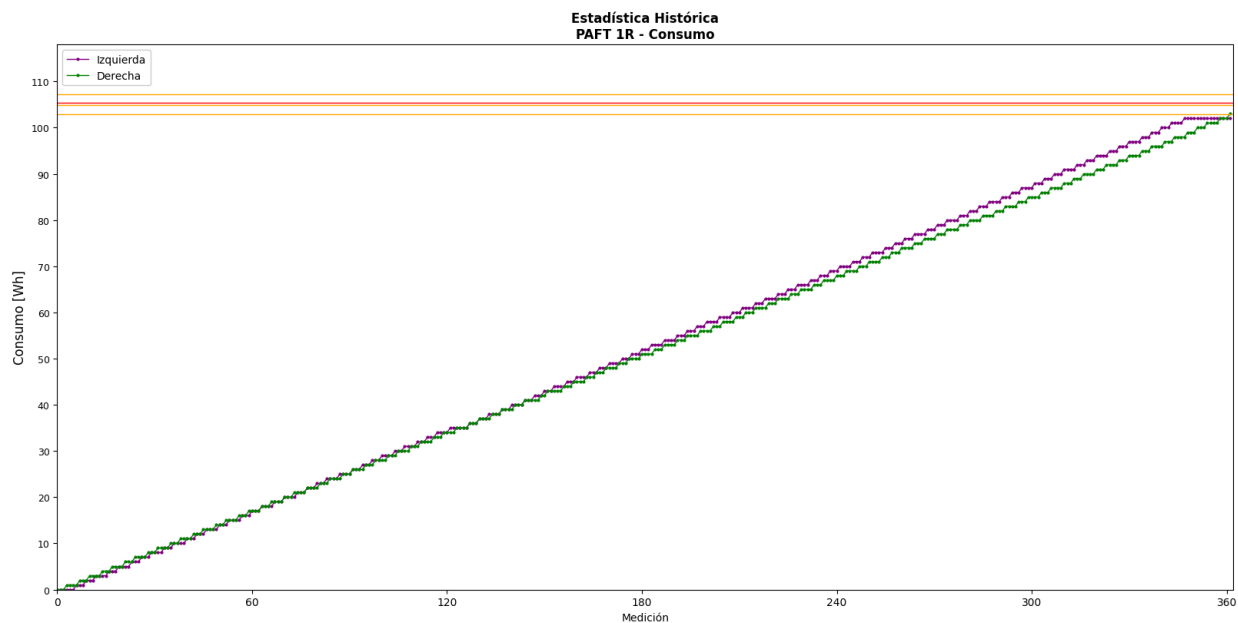


**Nota:** En Morado, los datos históricos para la sección Izquierda y el promedio representativo del conjunto de mediciones. En Verde, los datos históricos para la sección Derecha y el promedio representativo del conjunto de mediciones. En Rojo, el valor ideal para cada variable. En Amarillo, los valores de la tolerancia establecida para cada variable.

Para el consumo eléctrico de la carga mínima (Fig. 65) se evidencia sigue el comportamiento acumulado esperado, pero no alcanza a llegar a los valores ideales y esperados (valores de la tolerancia), lo cual indica una potencia menor demandada frente a lo planteado en los modelos matemáticos.

## Figura 65

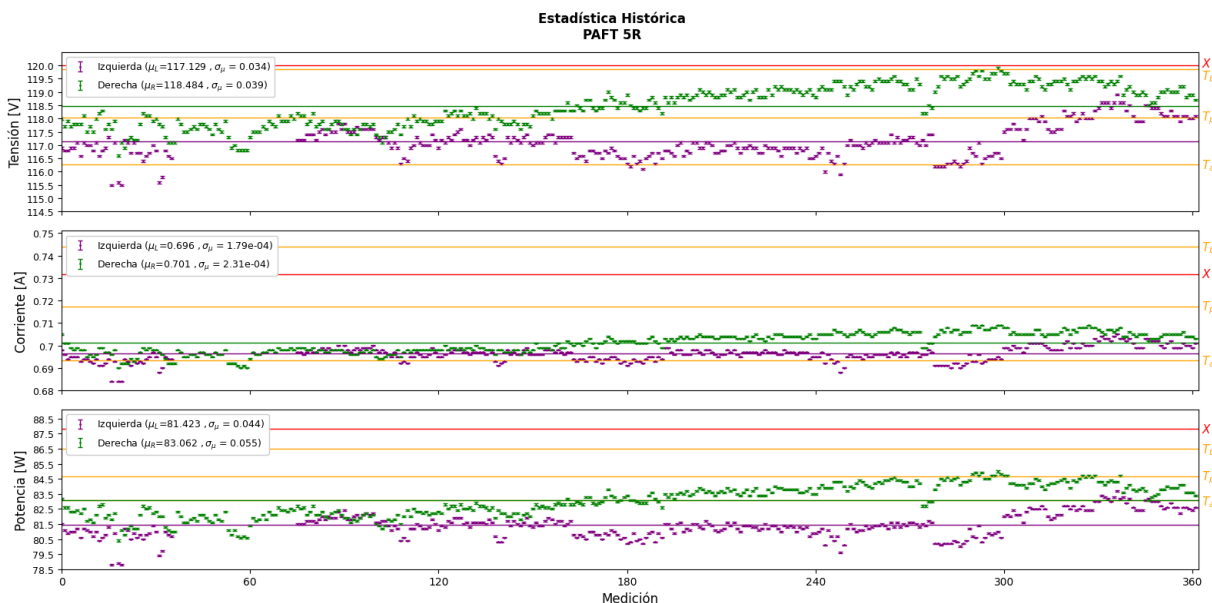
*Estadística histórica del consumo eléctrico para 1 resistor*



**Nota:** En Morado, los datos históricos para la sección Izquierda. En Verde, los datos históricos para la sección Derecha. En Rojo, el valor ideal para cada variable. En Amarillo, los valores de la tolerancia establecida para cada variable. Nótese que el consumo es una variable acumulada.

En la Figura 66 se presenta la evolución temporal de las mediciones para la configuración de carga media. Se observa un inapreciable Error Estándar (representado por las barras de error de cada variable) pero si una dispersión significativa, que es mayor para la variable de tensión debido a la red eléctrica. No obstante, corriente y potencia se aprecia intervalos de las mediciones con baja dispersión lo cual significa una precisión aceptable de las mediciones. El rango amplio y la diferencia entre las estadísticas descriptivas para cada variable se determina su causa a partir de estos resultados, en los cuales se identifica una tendencia creciente para la sección Izquierda y una decreciente al principio y creciente al final para la sección Derecha. Adicional, para la sección Izquierda se presentó una pérdida de datos debido a una desconexión del Tomacorriente Inteligente durante la prueba.

**Figura 66**  
*Estadística histórica para 5 resistores*

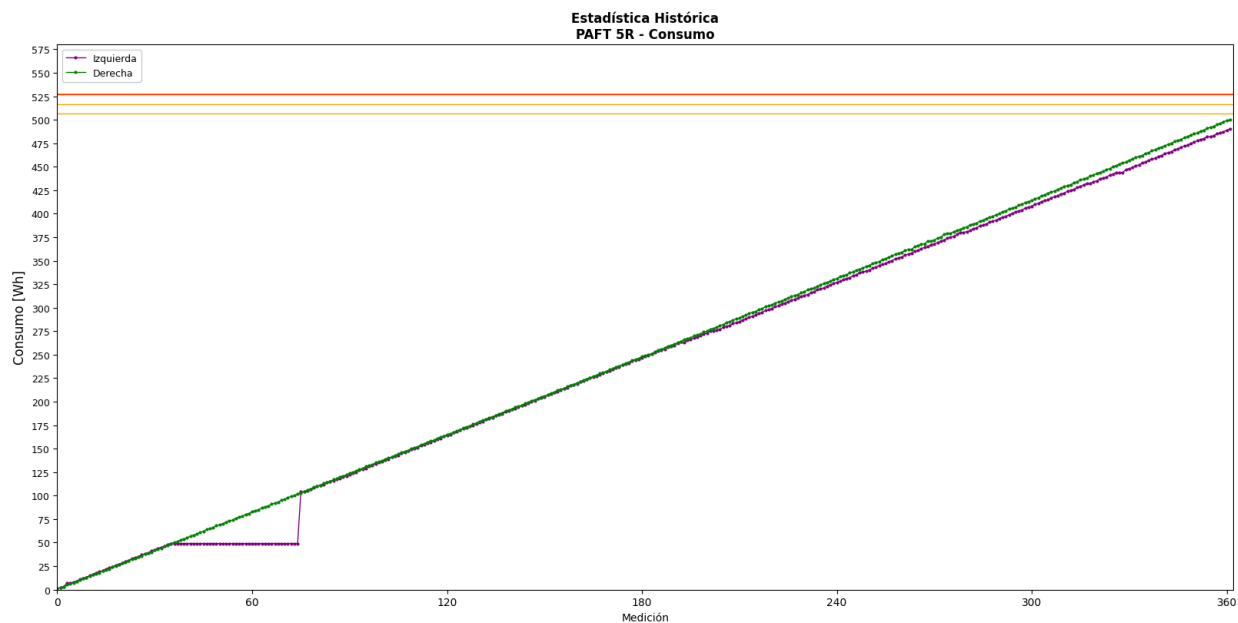


**Nota:** En Morado, los datos históricos para la sección Izquierda y el promedio representativo del conjunto de mediciones. En Verde, los datos históricos para la sección Derecha y el promedio representativo del conjunto de mediciones. En Rojo, el valor ideal para cada variable. En Amarillo, los valores de la tolerancia establecida para cada variable.

Para el consumo eléctrico de la carga media (Fig. 67) se evidencia sigue el comportamiento acumulado esperado, pero no alcanza a llegar a los valores ideales y esperados (valores de la tolerancia), lo cual indica una potencia menor demandada frente a lo planteado en los modelos matemáticos. Se evidencia la desconexión del Tomacorriente Inteligente que genero una perdida de datos cuando se realizó la prueba con la sección Izquierda.



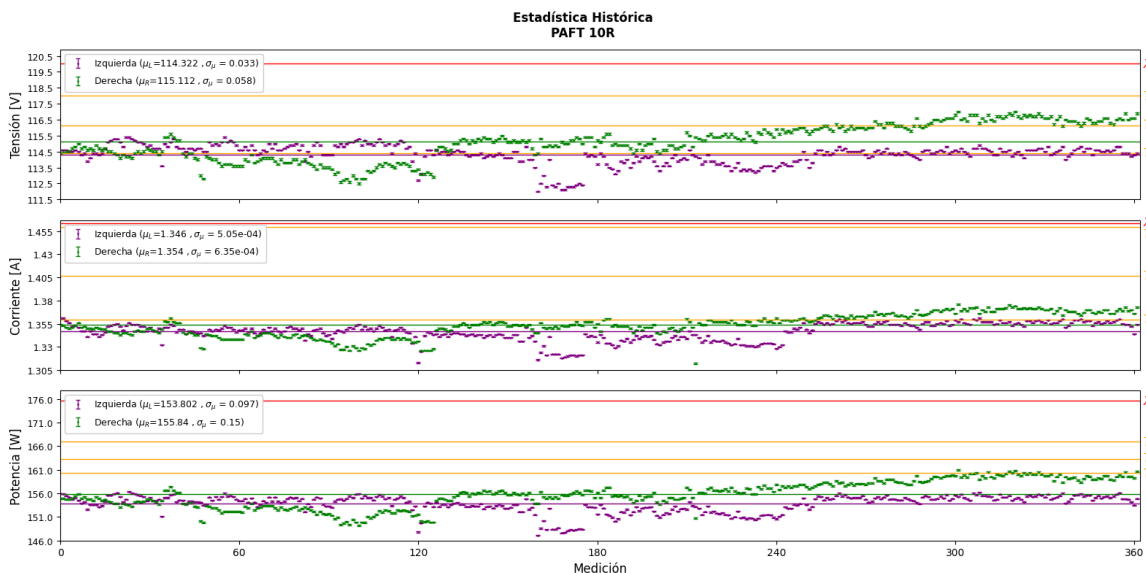
**Figura 67**  
*Estadística histórica del consumo eléctrico para 5 resistores*



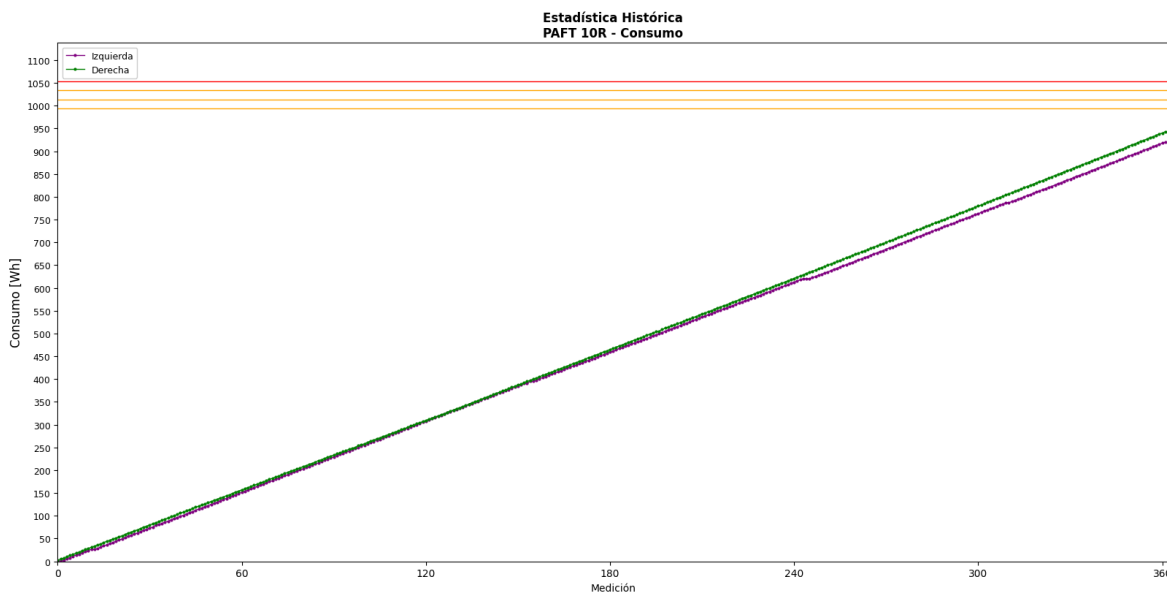
**Nota:** En Morado, los datos históricos para la sección Izquierda. En Verde, los datos históricos para la sección Derecha. En Rojo, el valor ideal para cada variable. En Amarillo, los valores de la tolerancia establecida para cada variable. Nótese que el consumo es una variable acumulada.

En la Figura 68 se presenta la evolución temporal de las mediciones para la configuración de carga máxima. Se observa un inapreciable Error Estándar (representado por las barras de error de cada variable) pero si una dispersión significativa, que es mayor para la variable de tensión debido a la red eléctrica. No obstante, corriente y potencia se aprecia intervalos de las mediciones con baja dispersión lo cual significa una precisión aceptable de las mediciones. El rango amplio evidenciado en las estadísticas descriptivas para cada variable se determina su causa a partir de estos resultados, en los cuales se identifica tendencias crecientes/decrecientes para ambas secciones.

Para el consumo eléctrico de la carga máxima (Fig. 69) se evidencia que sigue el comportamiento acumulado esperado, pero no alcanza a llegar a los valores ideales y esperados, lo cual indica una potencia menor demandada frente a lo planteado en los modelos matemáticos.

**Figura 68***Estadística histórica para 10 resistores*

**Nota:** En Morado, los datos históricos para la sección Izquierda y el promedio representativo del conjunto de mediciones. En Verde, los datos históricos para la sección Derecha y el promedio representativo del conjunto de mediciones. En Rojo, el valor ideal para cada variable. En Amarillo, los valores de la tolerancia establecida para cada variable.

**Figura 69***Estadística histórica del consumo eléctrico para 10 resistores*

**Nota:** En Morado, los datos históricos para la sección Izquierda. En Verde, los datos históricos para la sección Derecha. En Rojo, el valor ideal para cada variable. En Amarillo, los valores de la tolerancia establecida para cada variable. Nótese que el consumo es una variable acumulada.

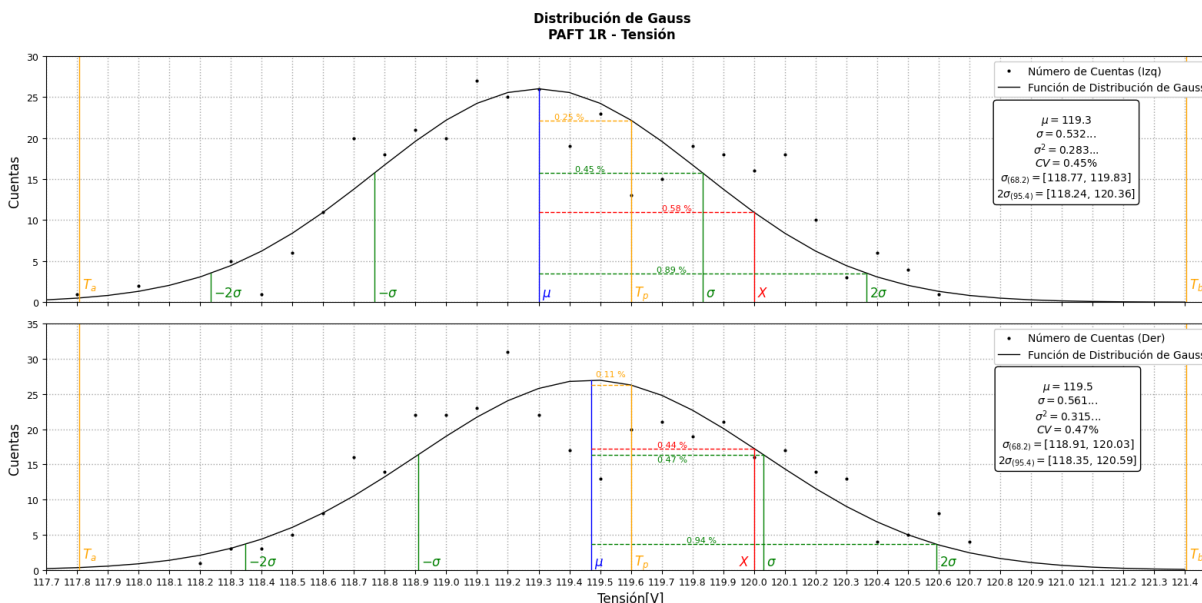
### *Distribución de Gauss*

Los resultados de las Distribuciones de Gauss de las mediciones entregadas por el Tomacorriente Inteligente se muestran las variables de tensión, corriente y potencia respectivamente en las figuras 70, 71 y 72 para la prueba de carga mínima, en las figuras 73, 74 y 75 para la prueba de carga media y en las figura 76, 77 y 78 para la prueba de carga máxima. Para el consumo eléctrico, debido a ser acumulativo, no se generan Distribuciones de Gauss.

A partir de la Figura 70 se soporta la confiabilidad del Tomacorriente Inteligente para la carga mínima, pues para ambas secciones los estadísticos de dispersión fueron similares lo cual indica un comportamiento parecido en la medición de Tensión. Igualmente, a pesar de lo evidenciado en los resultados estadísticos descriptivos e históricos, a través de los Coeficientes de Variación, se muestra una baja dispersión relativa de las mediciones lo cual indica una alta precisión, que para este caso, fue menor a  $\pm 1.0\%$  para el 95.4 % de las cuentas ( $2\sigma$ ) y una alta veracidad media menor al 0.3 % frente al valor esperado (valor medio de la tolerancia), para ambas secciones del Tomacorriente Inteligente.

**Figura 70**

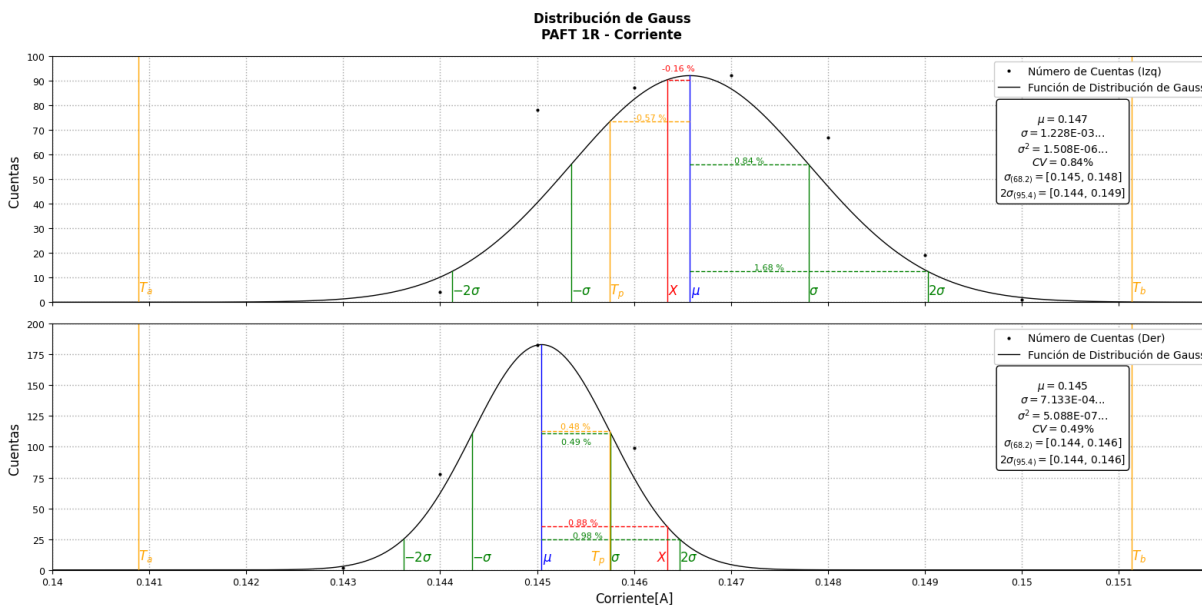
*Distribución de Gauss de Tensión para 1 resistor*



**Nota:** En Negro, la nube de datos y la curva la Distribución de Gauss. En Rojo, el valor esperado y el ERP frente al centroide. En Amarillo, los valores de la tolerancia establecida y el ERP frente al centroide. En Azul, el centroide establecido para la distribución. En Verde, los valores para 1 y 2 desviaciones estándar y los ERP frente al centroide. En la Tabla, los valores para el centroide, la desviación estándar, la varianza, el coeficiente de variación, y el rango para 1 y 2 desviaciones estándar.

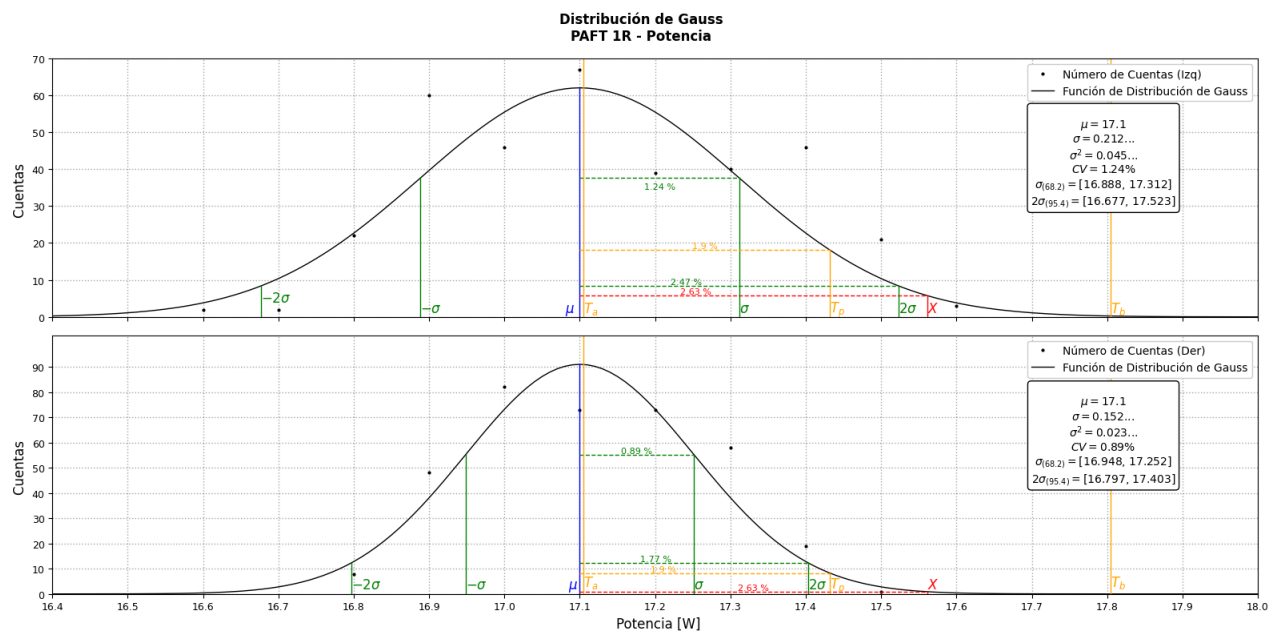
Para la medición de corriente, se evidencia en la Figura 71, aunque los estadísticos de dispersión presentan una diferencia apreciable, se mantienen dentro de unos valores que determinan una alta precisión y veracidad. El Coeficientes de Variación muestra una baja dispersión relativa de las mediciones lo cual indica una alta precisión, que para este caso, fue menor a  $\pm 2.0\%$  para el  $95.4\%$  de las cuentas ( $2\sigma$ ) y una alta veracidad media menor al  $0.6\%$  frente al valor esperado (valor medio de la tolerancia), para ambas secciones del Tomacorriente Inteligente.

**Figura 71**  
*Distribución de Gauss de Corriente para 1 resistor*



**Nota:** En Negro, la nube de datos y la curva la Distribución de Gauss. En Rojo, el valor esperado y el ERP frente al centroide. En Amarillo, los valores de la tolerancia establecida y el ERP frente al centroide. En Azul, el centroide establecido para la distribución. En Verde, los valores para 1 y 2 desviaciones estándar y los ERP frente al centroide. En la Tabla, los valores para el centroide, la desviación estándar, la varianza, el coeficiente de variación, y el rango para 1 y 2 desviaciones estándar.

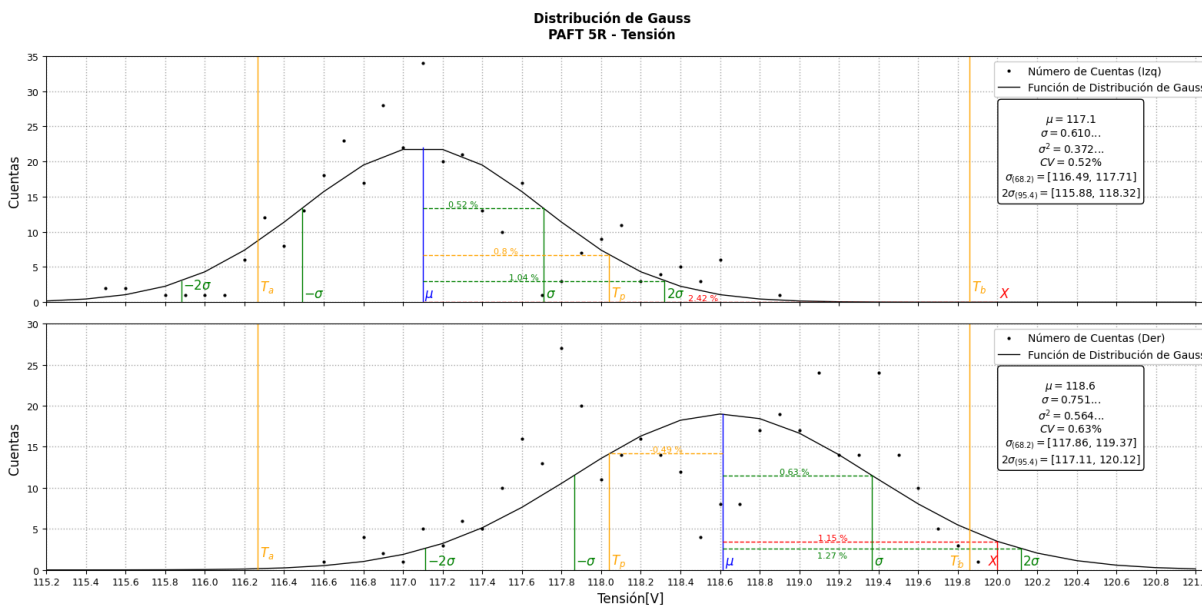
Para la medición de potencia, se evidencia en la Figura 72, aunque los estadísticos de dispersión son similares y se mantienen dentro de unos valores que determinan una alta precisión y veracidad. El Coeficientes de Variación muestra una baja dispersión relativa de las mediciones lo cual indica una precisión aceptable, que para este caso, fue menor a  $\pm 2.5\%$  para el 95.4 % de las cuentas ( $2\sigma$ ) y una veracidad media aceptable menor al 2.0 % frente al valor esperado (valor medio de la tolerancia), para ambas secciones del Tomacorriente Inteligente.

**Figura 72***Distribución de Gauss de Potencia para 1 resistor*

**Nota:** En Negro, la nube de datos y la curva la Distribución de Gauss. En Rojo, el valor esperado y el ERP frente al centroide. En Amarillo, los valores de la tolerancia establecida y el ERP frente al centroide. En Azul, el centroide establecido para la distribución. En Verde, los valores para 1 y 2 desviaciones estándar y los ERP frente al centroide. En la Tabla, los valores para el centroide, la desviación estándar, la varianza, el coeficiente de variación, y el rango para 1 y 2 desviaciones estándar.

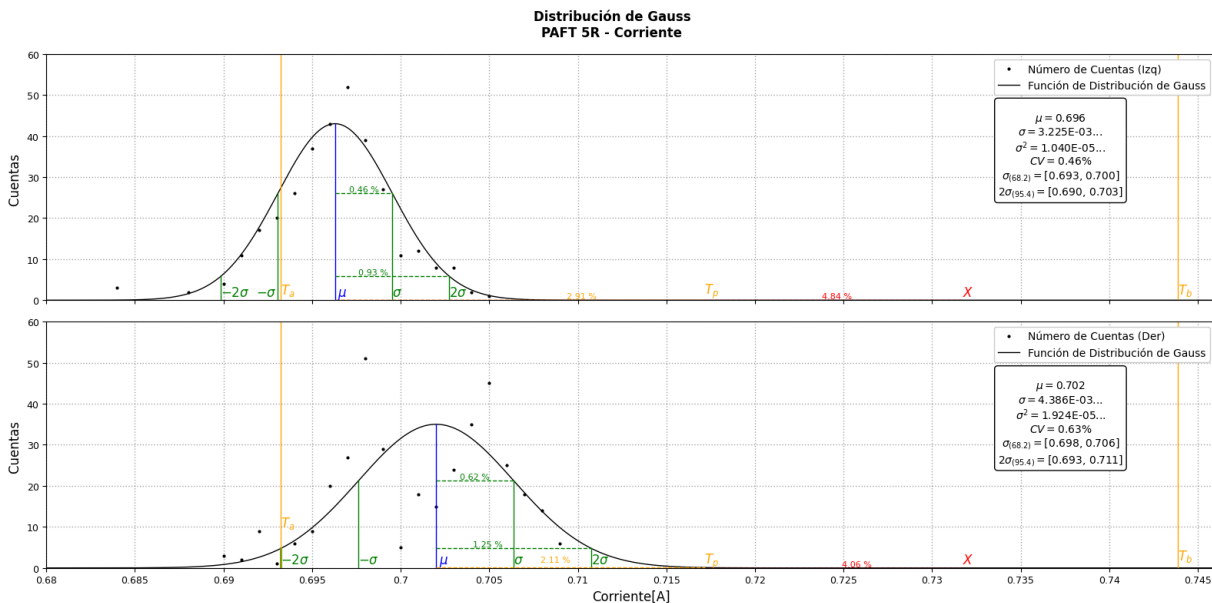
A partir de la Figura 73 se soporta la confiabilidad del Tomacorriente Inteligente para la carga media, pues, a pesar de las ligeras diferencias entre la Distribución de Gauss, los estadísticos de dispersión se mantienen en unos valores aceptables de precisión y veracidad. Igualmente, a pesar de lo evidenciado en los resultados estadísticos descriptivos e históricos, a través de los Coeficientes de Variación, se muestra una baja dispersión relativa de las mediciones lo cual indica una alta precisión, que para este caso, fue menor a  $\pm 1.3\%$  para el 95.4% de las cuentas ( $2\sigma$ ) y una alta veracidad media menor al 0.9% frente al valor esperado (valor medio de la tolerancia), para ambas secciones del Tomacorriente Inteligente.

**Figura 73**  
*Distribución de Gauss de Potencia para 5 resistores*



**Nota:** En Negro, la nube de datos y la curva la Distribución de Gauss. En Rojo, el valor esperado y el ERP frente al centroide. En Amarillo, los valores de la tolerancia establecida y el ERP frente al centroide. En Azul, el centroide establecido para la distribución. En Verde, los valores para 1 y 2 desviaciones estándar y los ERP frente al centroide. En la Tabla, los valores para el centroide, la desviación estándar, la varianza, el coeficiente de variación, y el rango para 1 y 2 desviaciones estándar.

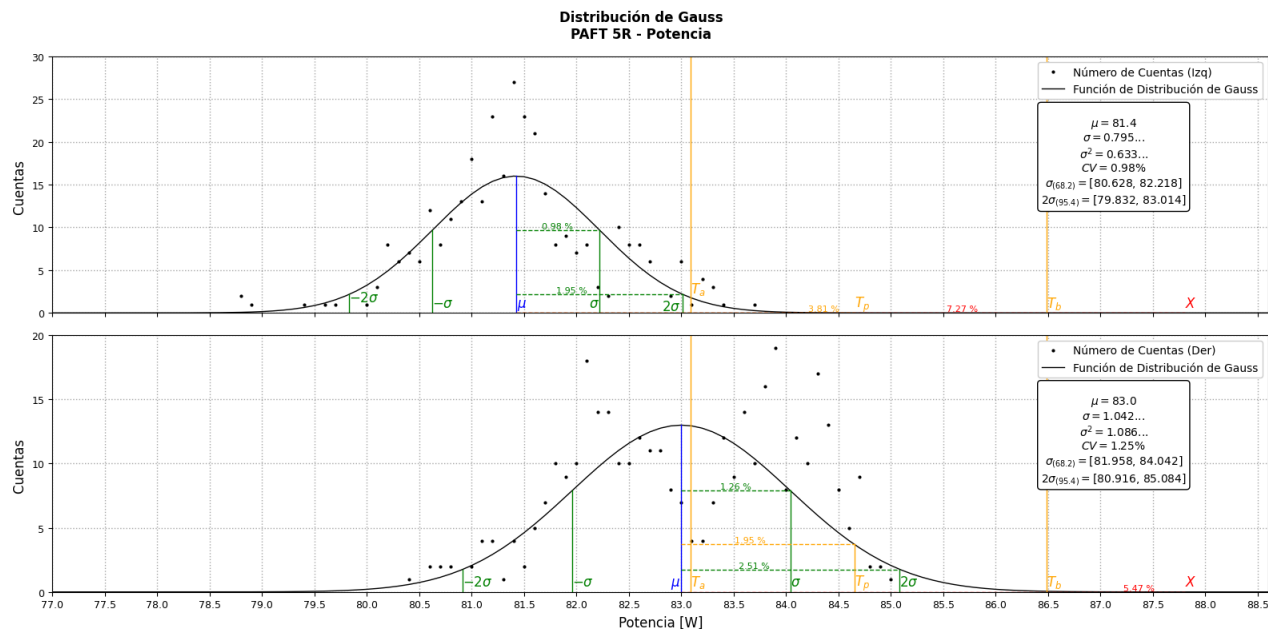
Para la medición de corriente, se evidencia en la Figura 74 que los estadísticos de dispersión son similares y se mantienen dentro de unos valores que determinan una precisión y veracidad aceptable. El Coeficientes de Variación muestra una baja dispersión relativa de las mediciones lo cual indica una alta precisión, que para este caso, fue menor a  $\pm 1.3\%$  para el 95.4% de las cuentas ( $2\sigma$ ). No obstante, aunque la veracidad media fue menor al 3.0% frente al valor esperado (valor medio de la tolerancia) para ambas secciones, según la Distribución de Gauss las mediciones de corriente no tienen probabilidad de medir dicho valor lo cual no es óptimo.

**Figura 74***Distribución de Gauss de Corriente para 5 resistores*

**Nota:** En Negro, la nube de datos y la curva la Distribución de Gauss. En Rojo, el valor esperado y el ERP frente al centroide. En Amarillo, los valores de la tolerancia establecida y el ERP frente al centroide. En Azul, el centroide establecido para la distribución. En Verde, los valores para 1 y 2 desviaciones estándar y los ERP frente al centroide. En la Tabla, los valores para el centroide, la desviación estándar, la varianza, el coeficiente de variación, y el rango para 1 y 2 desviaciones estándar.

Para la medición de potencia, se evidencia en la Figura 75, aunque los estadísticos de dispersión presentan una diferencia apreciable, se mantienen dentro de unos valores que determinan una precisión y veracidad aceptable. El Coeficientes de Variación muestra una baja dispersión relativa de las mediciones lo cual indica una precisión aceptable, que para este caso, fue menor a  $\pm 2.6\%$  para el 95.4% de las cuentas ( $2\sigma$ ) y una veracidad media aceptable del 1.95% frente al valor esperado (valor medio de la tolerancia) para la sección Derecha. Sin embargo, para la sección Izquierda fue del 3.81% pero el valor esperado no presenta probabilidad de medirse lo cual no es óptimo.

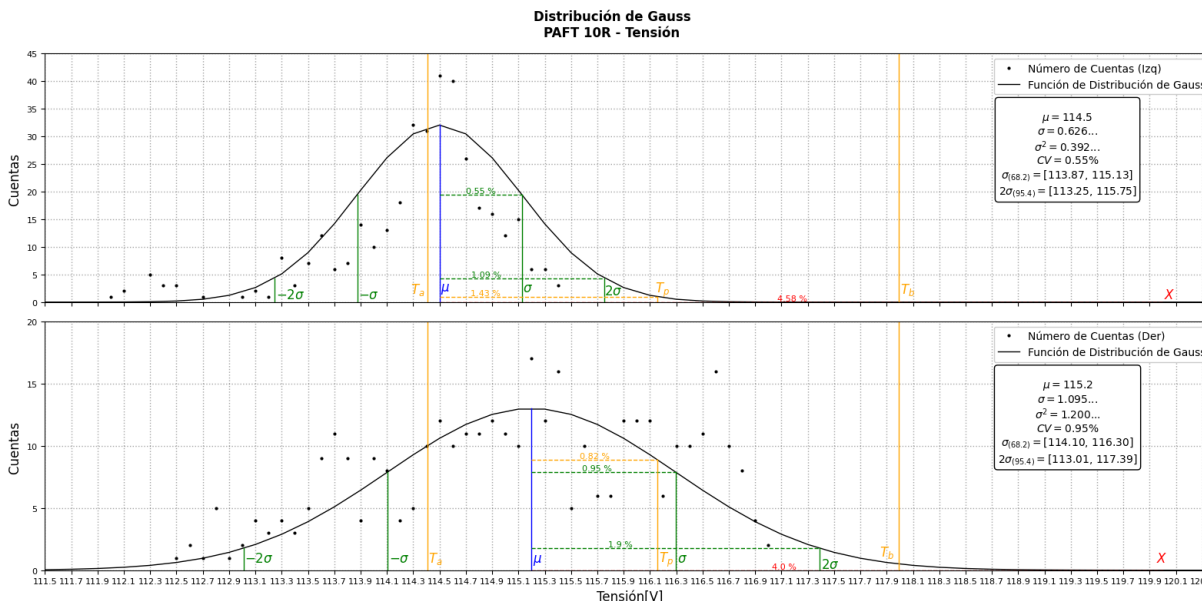


**Figura 75***Distribución de Gauss de Potencia para 5 resistores*

**Nota:** En Negro, la nube de datos y la curva la Distribución de Gauss. En Rojo, el valor esperado y el ERP frente al centroide. En Amarillo, los valores de la tolerancia establecida y el ERP frente al centroide. En Azul, el centroide establecido para la distribución. En Verde, los valores para 1 y 2 desviaciones estándar y los ERP frente al centroide. En la Tabla, los valores para el centroide, la desviación estándar, la varianza, el coeficiente de variación, y el rango para 1 y 2 desviaciones estándar.

A partir de la Figura 76 se soporta la confiabilidad del Tomacorriente Inteligente para la carga máxima, pues, a pesar de las ligeras diferencias entre los estadísticos de dispersión, se mantienen en unos valores aceptables de precisión y veracidad. Igualmente, a pesar de lo evidenciado en los resultados estadísticos descriptivos e históricos, a través de los Coeficientes de Variación, se muestra una baja dispersión relativa de las mediciones lo cual indica una alta precisión, que para este caso, fue menor a  $\pm 2.0\%$  para el 95.4% de las cuentas ( $2\sigma$ ) y una alta veracidad media menor al 1.5% frente al valor esperado (valor medio de la tolerancia), para ambas secciones del Tomacorriente Inteligente.

**Figura 76**  
Distribución de Gauss de Tensión para 10 resistores



**Nota:** En Negro, la nube de datos y la curva la Distribución de Gauss. En Rojo, el valor esperado y el ERP frente al centroide. En Amarillo, los valores de la tolerancia establecida y el ERP frente al centroide. En Azul, el centroide establecido para la distribución. En Verde, los valores para 1 y 2 desviaciones estándar y los ERP frente al centroide. En la Tabla, los valores para el centroide, la desviación estándar, la varianza, el coeficiente de variación, y el rango para 1 y 2 desviaciones estándar.

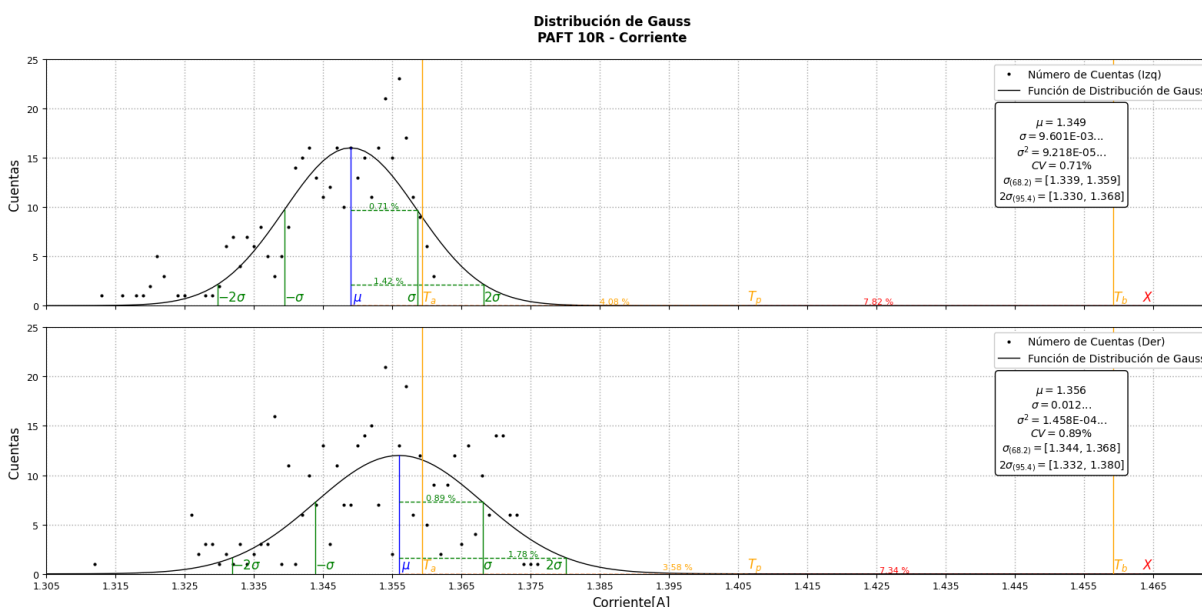
Para la medición de corriente, se evidencia en la Figura 77 que los estadísticos de dispersión son similares y se mantienen dentro de unos valores que determinan una precisión y veracidad aceptable. El Coeficientes de Variación muestra una baja dispersión relativa de las mediciones lo cual indica una alta precisión, que para este caso, fue menor a  $\pm 1.8\%$  para el 95.4% de las cuentas ( $2\sigma$ ). No obstante, aunque la veracidad media fue menor al 4.1% frente al valor esperado (valor medio de la tolerancia) para ambas secciones, según la Distribución de Gauss las mediciones de corriente no tienen probabilidad de medir dicho valor lo cual no es óptimo.

Para la medición de potencia, como se evidencia en la Figura 78 las curvas de Distribución

de Gauss no ajustan totalmente a los datos obtenidos de las mediciones (notese que el Coeficiente de Variación es mayor al 1 % lo cual indica una mayor dispersión relativa de las mediciones) por lo cual no se puede determinar la precisión y veracidad óptimamente de la medición de potencia para la carga máxima a partir de estos resultados.

### Figura 77

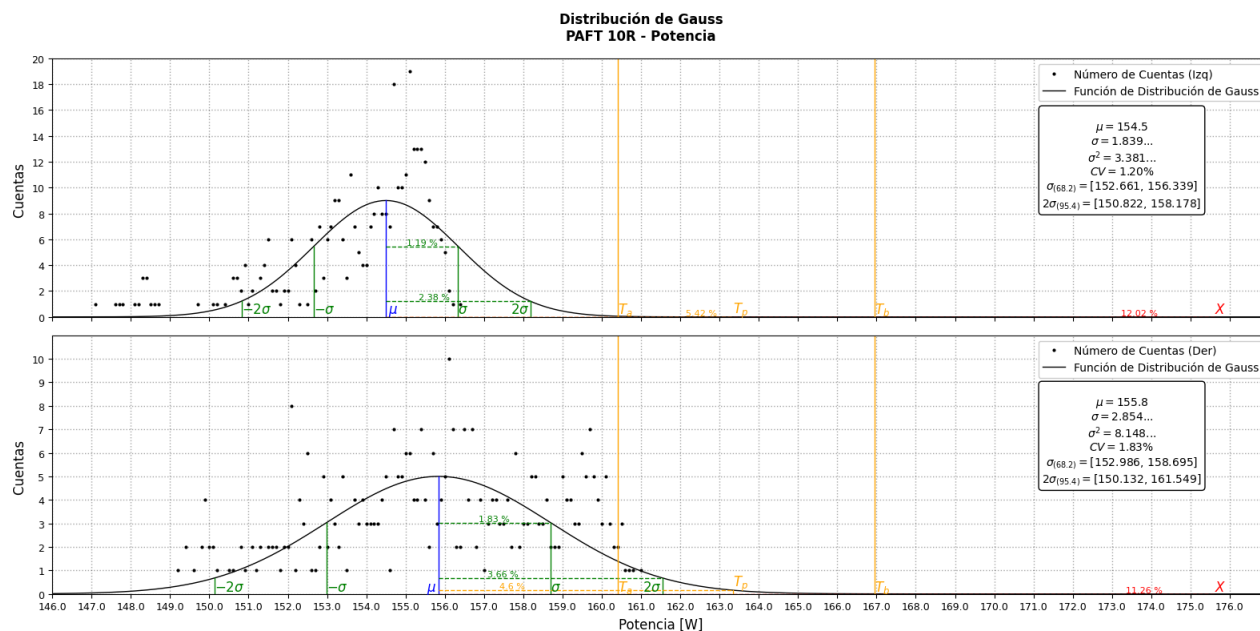
*Distribución de Gauss de Corriente para 10 resistores*



**Nota:** En Negro, la nube de datos y la curva la Distribución de Gauss. En Rojo, el valor esperado y el ERP frente al centroide. En Amarillo, los valores de la tolerancia establecida y el ERP frente al centroide. En Azul, el centroide establecido para la distribución. En Verde, los valores para 1 y 2 desviaciones estándar y los ERP frente al centroide. En la Tabla, los valores para el centroide, la desviación estándar, la varianza, el coeficiente de variación, y el rango para 1 y 2 desviaciones estándar.

**Figura 78**

*Distribución de Gauss de Potencia para 10 resistores.*



**Nota:** En Negro, la nube de datos y la curva la Distribución de Gauss. En Rojo, el valor esperado y el ERP frente al centroide. En Amarillo, los valores de la tolerancia establecida y el ERP frente al centroide. En Azul, el centroide establecido para la distribución. En Verde, los valores para 1 y 2 desviaciones estándar y los ERP frente al centroide. En la Tabla, los valores para el centroide, la desviación estándar, la varianza, el coeficiente de variación, y el rango para 1 y 2 desviaciones estándar.

### **Estadística Comparativa**

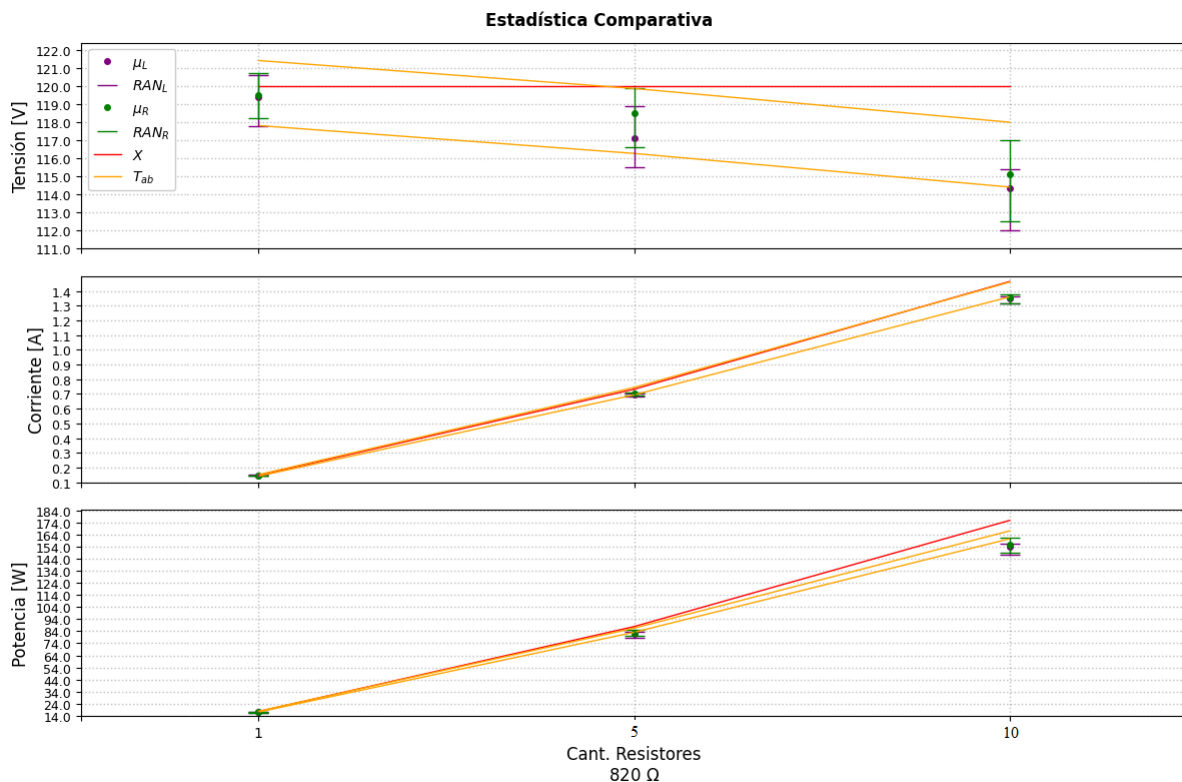
Los resultados de las Estadísticas Comparativas de las mediciones entregadas por el Tomacorriente Inteligente y los modelos matemáticos frente a la cantidad de resistores conectados en las tres pruebas se muestran, para las variables de tensión, corriente y potencia en conjunto en la Figura 79, y para el consumo eléctrico en la Figura 80.

En la Figura 79 se muestra el comportamiento de cada variable frente al aumento de la cantidad total de resistores conectados en la carga de prueba. En Rojo, el comportamiento ideal; en Amarillo, el comportamiento esperado; en Morado para la sección Izquierda y en Verde para la sección Derecha, el comportamiento obtenido con el Tomacorriente Inteligente representado por

el promedio y el rango de las mediciones.

**Figura 79**

*Estadística comparativa del Tomacorriente Inteligente*



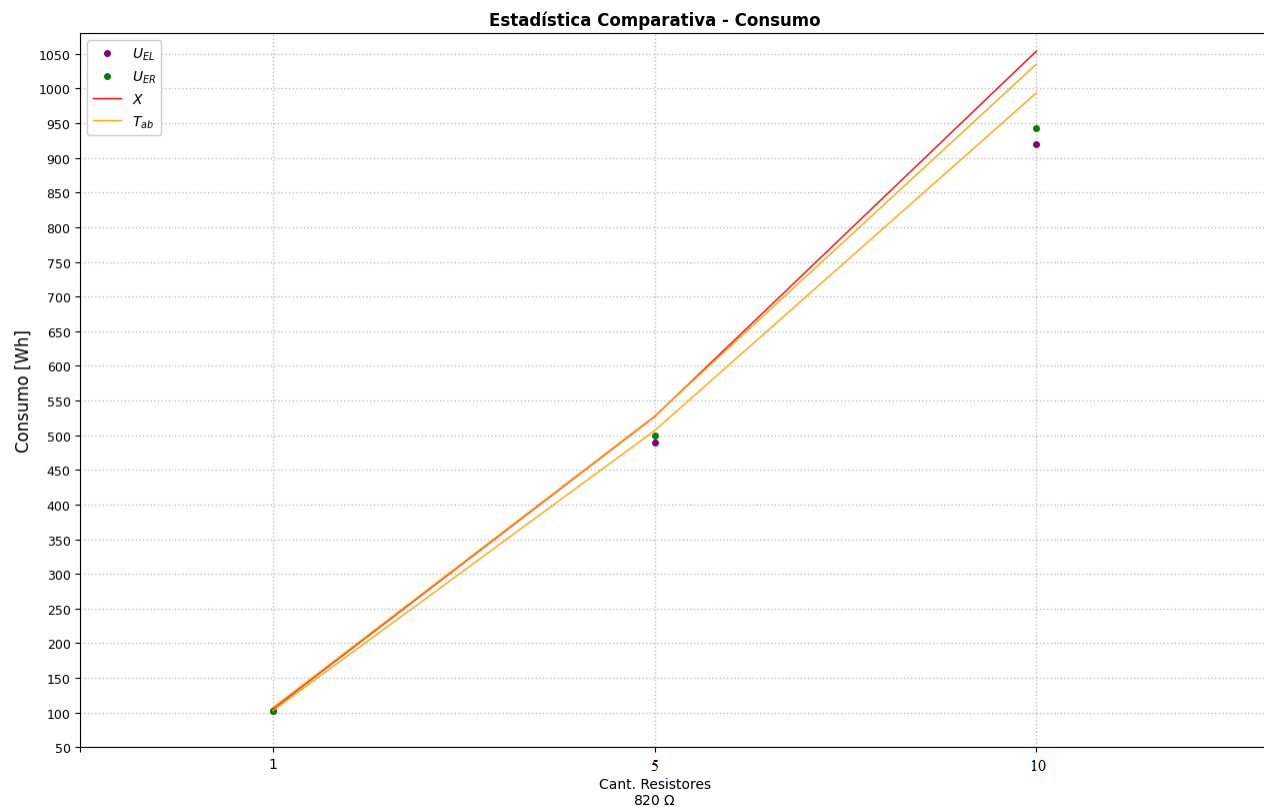
**Nota:** Comparación del rango y el promedio obtenido (Morado para sección Izquierda, Verde para sección Derecha) para las variables de Tensión, Corriente y Potencia, sus valores ideales (Rojo) y sus tolerancias (Amarillo) vs la Cantidad de resistores.

Notese que los conjuntos de las mediciones obtenidas con el Tomacorriente Inteligente tienen el comportamiento esperado (decreciente para tensión y creciente para corriente y potencia), aunque existiendo rangos por fuera de las tolerancias establecidas. El comportamiento esperado de la tensión varía con respecto al ideal debido a las caídas de tensión que se producen debido a las resistencias adicionales y al aumento de la resistencia total del Circuito de prueba.

Frente al consumo eléctrico (Fig. 80) se obtuvo el comportamiento esperado (creciente), sin embargo se presentan los valores acumulados por fuera de las tolerancias establecidas.

**Figura 80**

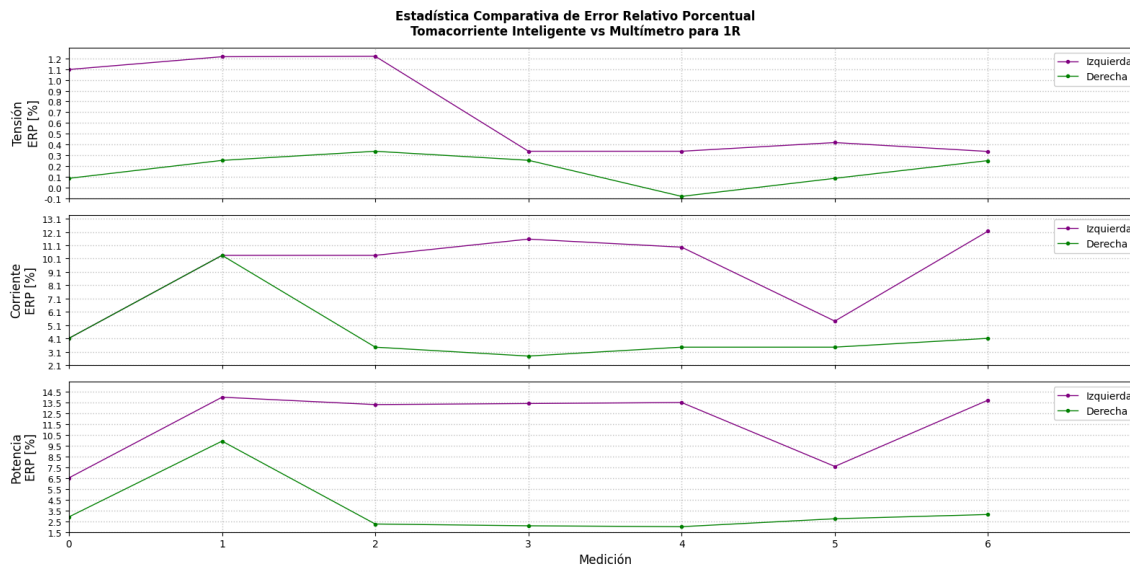
*Estadística comparativa del consumo eléctrico del Tomacorriente Inteligente*



**Nota:** Comparación del valor acumulado obtenido (Morado para sección Izquierda, Verde para sección Derecha) del consumo eléctrico, sus valores ideales (Rojo) y sus tolerancias (Amarillo) vs la Cantidad de resistores.

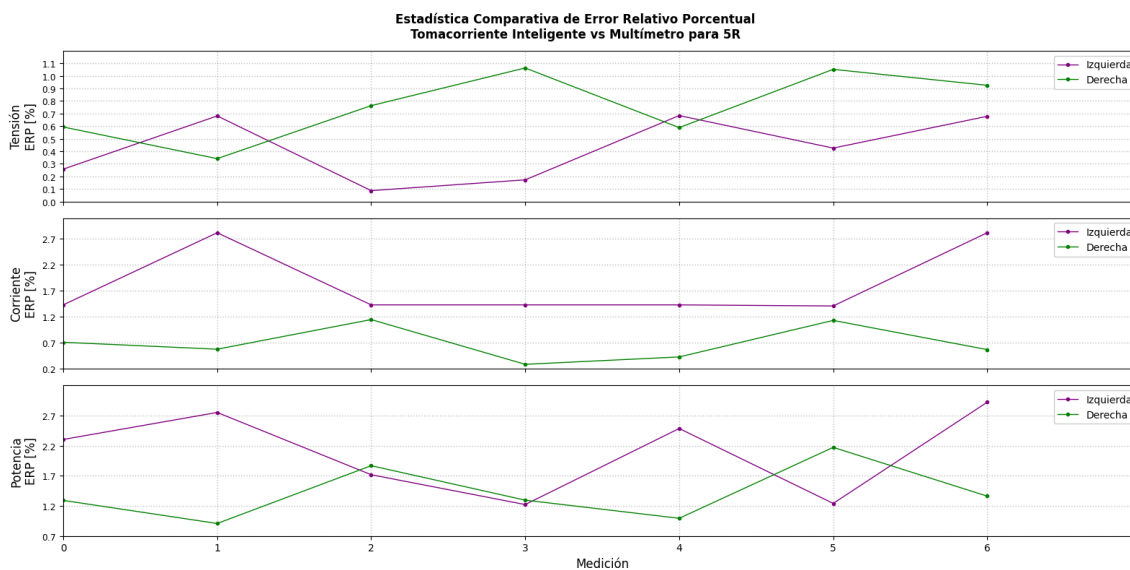
A pesar de la existencia de valores por fuera de las tolerancias establecidas, lo cual se evalúa mas adelante, las cuatro variables eléctricas medidas tuvieron el comportamiento esperado por lo cual se concluye que el Tomacorriente Inteligente es confiable para la medición de dichas variables.

**Figura 81**  
*Estadística Comparativa del ERP para 1 Resistor*



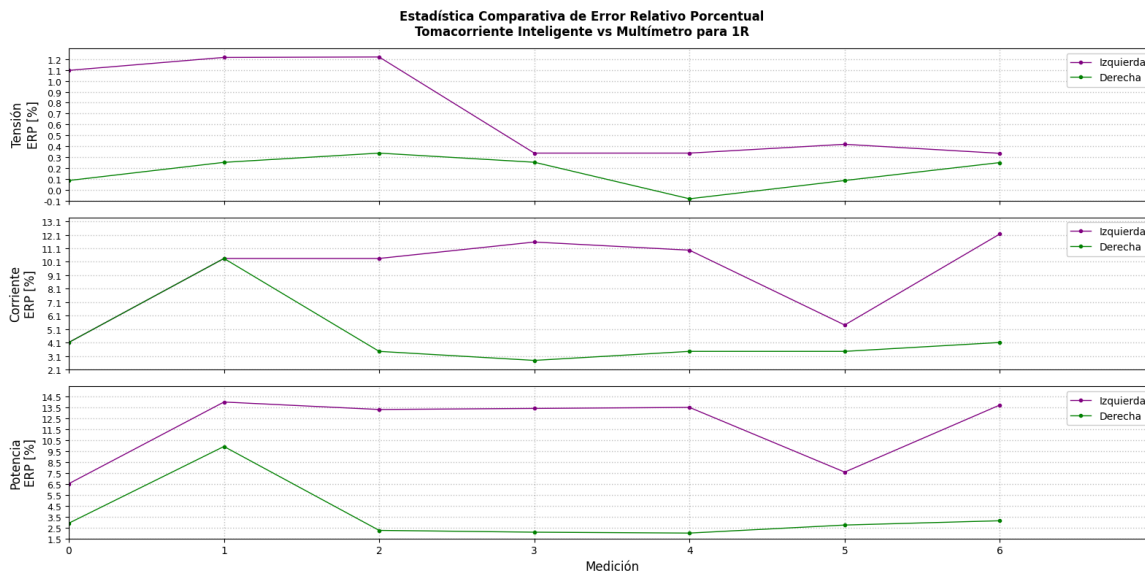
**Nota:** Estadística comparativa del ERP de las variables de Tensión, Corriente y Potencia entre las mediciones realizada con el multímetro y las entregadas por Tomacorriente Inteligente en el mismo instante de tiempo para 1 resistor. En Morado, para la sección Izquierda. En Verde, para la sección Derecha.

**Figura 82**  
*Estadística Comparativa del ERP para 5 Resistores*



**Nota:** Estadística comparativa del ERP de las variables de Tensión, Corriente y Potencia entre las mediciones realizada con el multímetro y las entregadas por Tomacorriente Inteligente en el mismo instante de tiempo para 5 resistores. En Morado, para la sección Izquierda. En Verde, para la sección Derecha.

**Figura 83**  
*Estadística Comparativa del ERP para 10 Resistores*



**Nota:** Estadística comparativa del ERP de las variables de Tensión, Corriente y Potencia entre las mediciones realizada con el multímetro y las entregadas por Tomacorriente Inteligente en el mismo instante de tiempo para 10 resistores. En Morado, para la sección Izquierda. En Verde, para la sección Derecha.

Es importante notar que los ERP se corresponden entre el valor de tensión medido por el Tomacorriente Inteligente  $V_{TI}$  y el medido en la Carga de prueba con multímetro  $V_L$ , el valor de corriente medido por el Tomacorriente Inteligente  $I_{TI}$  y el medido en la Carga de prueba con multímetro  $I_L$  y el valor de potencia medido por el Tomacorriente Inteligente  $P_{TI}$  y el valor de potencia calculado para la Carga de prueba  $P_L$  a partir de las mediciones de tensión y corriente del multímetro. Siguiendo el modelo matemático aproximado, los valores medidos con el Tomacorriente Inteligente serán diferentes a los medidos con multímetro y por lo tanto existirá un ERP apreciable como se evidencia las anteriores figuras. Sin embargo, los ERP presentan una variación significativa con comportamientos tanto similares como diferentes entre secciones del Tomacorriente Inteligente para cada variable por lo que se debe evaluar este comportamiento.



## **Análisis de la Evaluación**

El análisis consolidado, de forma general, de los resultados obtenidos en la evaluación del prototipo se categorizan como sigue:

### ***Comportamiento de las Variables Eléctricas***

Las variables eléctricas de tensión, corriente, potencia y consumo eléctrico se comportaron como se esperaba según los modelos matemáticos.

De forma general, se produjo la variación de tensión teorizada tanto de la red eléctrica como en el circuito de prueba, demostrando que esta variable no es de un valor constante, y por lo tanto, es necesario aplicar el proceso de medición de la tensión para aumentar la exactitud del cálculo del consumo eléctrico.

El modelo matemático ideal teoriza que a mayor cantidad de resistores de igual valor de resistencia en un circuito paralelo, mayor será la intensidad de corriente total del circuito. A través de las tres pruebas realizadas se validó este comportamiento, por lo que el circuito de prueba se comporta de la forma esperada en cuanto al aumento de la corriente total del circuito a medida que aumenta la cantidad de resistores.

El modelo matemático aproximado teoriza que la tensión medible por el Tomacorriente Inteligente y en la carga de prueba, serán menores que el valor ideal de tensión, debido a las caídas de tensión que se producen en las diferentes resistencias adicionales del circuito de prueba. Con las diferentes estadísticas se comprobó la premisa que debido a las resistencias adicionales del circuito, y a mayor sea el valor de la resistencia de la carga de prueba, las tensiones medibles serán menores que el valor ideal.

Adicional, debido a las resistencias adicionales y las tolerancias del circuito de prueba, los

valores de corriente y de potencia pueden ser mayores o menores (con una tendencia a disminuir a medida que aumenta la cantidad de resistores) con respecto a los valores establecidos en el modelo matemático ideal. Con los resultados obtenidos, se comprobó esta premisa, en la cual los valores de corriente y potencia tendieron a ser menores, debido al aumento de la resistencia total del circuito, que los respectivos valores ideales.

Debido a que el consumo eléctrico depende directa y proporcionalmente a la potencia eléctrica del circuito de prueba, y debido a que esta es menor frente al modelo matemático ideal, el consumo eléctrico acumulado obtenido en cada prueba también será menor frente a los valores ideales. Con las estadísticas históricas se comprobó la anterior premisa.

Los comportamientos anteriores determinan que el prototipo desarrollado y el circuito de prueba se comportaron, cualitativamente, de la forma esperada frente a los modelos matemáticos, lo cual significa un correcto montaje y desarrollo del prototipo y del circuito de prueba en general.

Así, con el anterior análisis del comportamiento general de las variables eléctricas, se concluye que el prototipo desarrollo del sistema de telegestión IoT es confiable para su uso en redes eléctricas de las instalaciones BT-UG, debido a que presente el comportamiento cualitativo esperado con respecto a los modelos matemáticos.

### ***Exactitud de las Mediciones***

A partir de los resultados obtenidos de los análisis estadísticos descriptivo, histórico y de la Distribución de Gauss, se concluye que el Tomacorriente Inteligente presenta una exactitud aceptable en las mediciones de tensión, corriente y consumo. De forma general, la precisión y veracidad media fue aceptable para todos los conjuntos de mediciones, existiendo variaciones y errores de aproximaciones pequeñas pero no de alto impacto. En otras palabras, aunque el

Tomacorriente Inteligente no entregó la información con una exactitud aproximada al 100 %, si se corresponde con información real, verídica y útil para el análisis del comportamiento de las variables eléctricas.

Sin embargo, aunque no fue en un nivel extremo, para las mediciones de potencia se evidenció una mayor dispersión y menor veracidad de las mediciones con respecto a los valores esperados. Lo anterior debido, principalmente, a la propia red eléctrica, pues si el nivel de tensión varía, la potencia también lo hará. Adicional, el medidor PZEM-004T-100A mide la potencia activa mas no la aparente, fundamental para conocer realmente la potencia usada total de una carga AC. Por último, el error sistemático del modelamiento matemático, al basarse en equivalencia DC y no modelamiento AC directamente, introduce unos errores de aproximación de las variables eléctricas. Así, las tolerancias establecidas no son 100 % exactas lo cual incide en la determinación de la veracidad de las mediciones.

Considerando la naturaleza y alcance del proyecto, la evaluación de los parámetros del Tomacorriente Inteligente se considera satisfactoria, pues aunque no se alcanzó para las cuatro variables eléctricas una exactitud aproximada al 100 %, si se obtuvieron valores de precisión y veracidad media aceptables, lo cual significa una evaluación óptima, pues se demostró que el sistema de telegestión IoT es aplicable y confiable para implementarse en las instalaciones BT-UG para la gestión energética, claramente realizando mejoras estructurales y funcionales.

### ***Errores Sistemáticos***

Debido a la imposibilidad de evaluar el prototipo desarrollado en un laboratorio controlador, calibrado y certificado, y producto también de la naturaleza misma del prototipo, se presentaron diferentes errores sistemáticos que incidieron en las variables eléctricas y las

mediciones obtenidas. Dentro de los errores sistemáticos identificados, se tienen:

**Tensión de la red eléctrica:** En varios de los Antecedentes se toma el valor eficaz de la tensión de la red eléctrica como constante para calcular el valor del consumo eléctrico. No obstante, a partir de la búsqueda de información, se evidenció que el valor eficaz de la tensión de la red eléctrica puede variar, y por lo tanto, si se toma como constante, afectaría la veracidad del cálculo del consumo eléctrico. En el proyecto se trató este error agregando el medidor eléctrico PZEM-004T-100A que realiza mediciones instantáneas de las variables de tensión y corriente, lo cual genera que los valores calculados de potencia y consumo eléctrico, los cuales también entrega el medidor eléctrico, sean más veraces.

**Cálculos de la potencia y el consumo eléctrico:** El método más extendido para el cálculo del consumo eléctrico es el acumulativo horario. No obstante, si la tensión y/o la corriente varían, la potencia también lo hará lo cual significa que en el periodo de tiempo de 1 hora, la potencia de un aparato eléctrica no será la misma. Así, para tratar este error sistemático el medidor eléctrico PZEM-004T-100A utiliza el método acumulativo instantáneo, en el cual cada 1 segundo realiza las mediciones respectivas de tensión y corriente para calcular el valor instantáneo de potencia y energía eléctrica. Por lo tanto, el prototipo desarrollado, gracias al medidor implementado, presenta una mayor confiabilidad y veracidad en la medición y cálculo de las variables eléctricas al realizar mediciones y cálculos cada 1 segundo y no cada 1 hora.

**Resistencias adicionales:** Las resistencias adicionales del circuito de prueba se consideran un error sistemático debido a que alejaron el circuito de prueba del circuito ideal teorizado. Debido a ello, se realizó el respectivo tratamiento de las resistencias adicionales para aumentar la exactitud de los análisis de resultados de las estadísticas obtenidas. Para ello, se realizó el modelo matemático aproximado, en el cual se incluyeron todas las resistencias

adicionales, y el cual permitió una mejor aproximación matemática del circuito de prueba, pronosticando los ERP de las mediciones frente al modelo matemático ideal. A través de las diferentes estadísticas se evidenció la importancia del modelo matemático aproximado y las tolerancias establecidas para realizar un análisis mas eficiente y veraz de los resultados obtenidos.

**Temperatura:** La resistencia eléctrica de un componente depende principalmente de su configuración física, pero también de la temperatura del componente. En el modelamiento matemático se tomo en cuenta que los resistores implementados en la carga de prueba disipan toda la potencia eléctrica en forma de calor, y por lo tanto, se genera un aumento de la temperatura de los resistores. Esto conlleva a su resistencia eléctrica aumente, y los valores de corriente, tensión y potencia varíen conforme a ello. Para evitar una alta incidencia de la temperatura en el circuito de prueba, lo cual conllevaría a mayores errores de aproximación de los resultados de las variables eléctricas, se implementó un sistema de refrigeración triple para los resistores de la carga de prueba con el fin de mitigar el aumento de temperatura debido a la disipación de calor. A través de las diferentes estadísticas, especialmente la de la resistencia total y la comparativa, se evidencia que la resistencia total del circuito de prueba no tuvo mayor variación, y por lo tanto, se mitigó la incidencia de la temperatura en el circuito de prueba. Inclusive, en las estadísticas histórica, se evidencia como a través del tiempo las variables eléctricas tienden a aumentar, lo cual significa una disminución de las pérdidas de potencia debido a la temperatura.

**Uso de cables:** Un error sistemático que afecto negativamente el desempeño del prototipo, especialmente durante la implementación, fue el uso de cables para las conexiones electrónicas del Tomacorriente Inteligente. Así, debido a ello, no se aseguró una calidad del 100 % en las conexiones y se presentaron fallas en las cuales se producían desconexiones o malos contactos que afectaban el funcionamiento de los diferentes componentes electrónicos, especialmente de los

medidores eléctricos. Aunque ello no afectó los resultados cuantitativos de las estadísticas, sí incidió negativamente en el desempeño del prototipo al producirse en algunas pruebas, menos cantidad de registros de mediciones válidos debido a la presencia de mediciones nulas producto de las desconexiones de los medidores eléctricos.

**Modelamiento DC:** Se identificó que el mayor error sistemático de incidencia fue el modelamiento DC aplicado a señales AC debido a una variable eléctrica que no tiene en cuenta el primero: la impedancia (resistencia compleja a la corriente AC la cual se compone de la resistencia eléctrica DC y la reactancia inductiva-capacitiva). Para bajas corrientes, la autoinducción en el cableado y componentes es prácticamente nula y la impedancia se aproxima a la resistencia eléctrica DC. Sin embargo, con el aumento de la intensidad de corriente, aumenta el valor de autoinducción y la reactancia inductiva se hace apreciable, alejando el valor de la impedancia de la resistencia eléctrica DC. Esta es la principal causa sobre el por qué de la inexactitud de las mediciones, especialmente para la carga máxima, presentada en los análisis estadísticos, pues el modelo aproximado se realizó con base al modelamiento DC sin tener en cuenta variables físicas que se presentan en circuitos AC. La razón de no aplicar modelamiento AC fue su complejidad, frente al modelamiento DC, y el requerimiento de instrumentación especializada para comprobar sus resultados. En otras palabras, el modelo matemático aproximado presenta un error sistemático y por lo tanto las tolerancias establecidas, aunque son próximas, no son exactas a los valores realmente esperados para cada variable, aumentando así el ERP de la veracidad media.

**Entorno controlado:** Aunque se evaluó el prototipo en un entorno controlado (con la Carga de prueba), no se contó con instrumentación y equipos especializados, lo cual conllevó a la agregación de prácticamente todos los errores sistemáticos anteriores. Para trabajos futuros se

debe procurar realizar la validación experimental en un laboratorio controlador, certificado y calibrado.

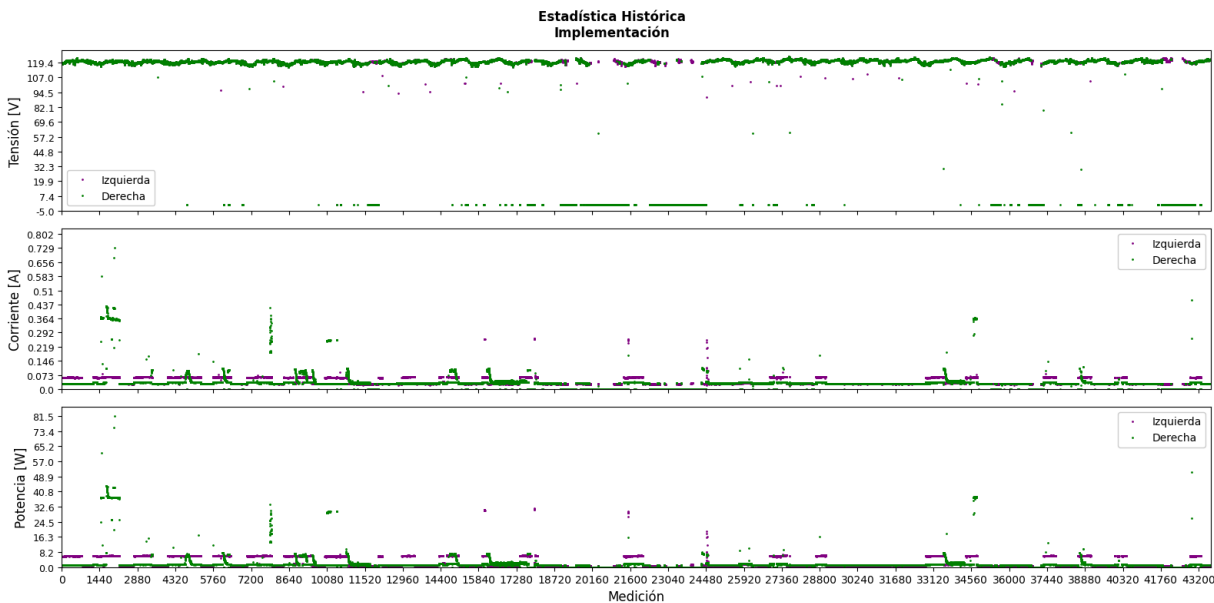
Se concluye, con el análisis de los anteriores errores sistemáticos, que fueron producto, principalmente, de un error humano mas no del prototipo como tal. Por lo tanto, es posible mitigar e inclusive anular dichos errores sistemáticos, mejorando el entorno de evaluación, para aumentar la exactitud de las mediciones hasta el nivel de calibración. En otras palabras, el prototipo es totalmente susceptible de mejorarse en un sistema calibrado, exacto y confiable para su uso comercial en instalaciones BT-UG.

### **Implementación**

Para la implementación durante los 31 días se esperaba obtener un mínimo de 44 640 registros, 1 440 por día (tomando como referencia que 1 registro se hace cada 1 minuto). No obstante, en el archivo de Registro se obtuvieron 43 668 registros (97.82 %) con 972 registros faltantes (2.18 %) (Fig. 84)

## Figura 84

### Estadística histórica de la implementación



**Nota:** Se muestra todo el conjunto de mediciones obtenidos para las variables de tensión, corriente y potencia

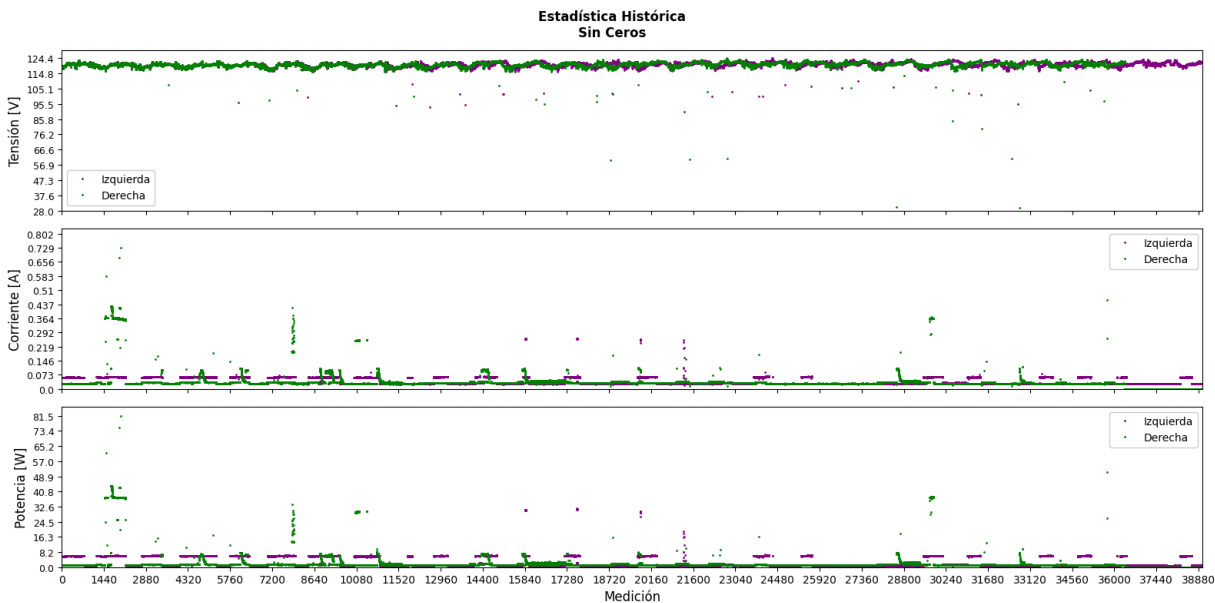
4 643 registros (10.63 %) fueron nulos para la sección Izquierda y 7 307 (16.73 %) para la Derecha, en los cuales las tres variables fueron 0. En la Figura 85 se presentan la totalidad de registros no nulos.

Se presentaron 25 registros (0.53 %), para ambas secciones, con anomalías en la tensión, es decir, valores por debajo de 110 V (Fig. 86)



**Figura 85**

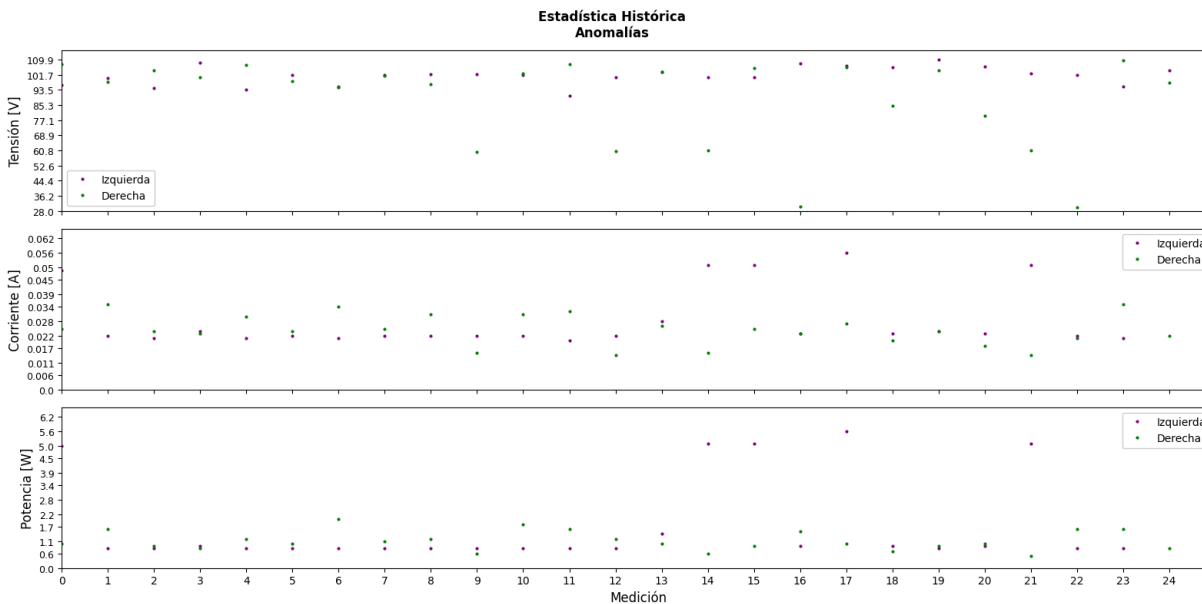
*Estadística histórica de la implementación depurada sin datos nulos*



**Nota:** Se muestran todas las mediciones en las cuales las tres variables (tensión, corriente y potencia) no fueron nulas.

**Figura 86**

*Estadística histórica de las anomalías*

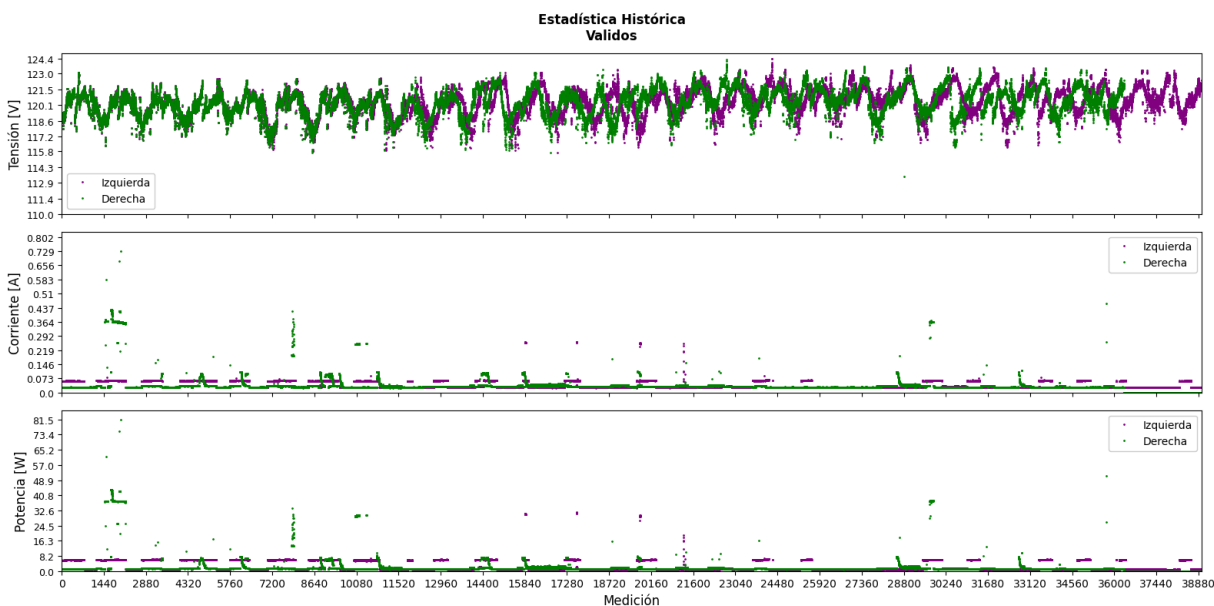


**Nota:** Se muestra la estadística histórica con las anomalías presentadas (valores por debajo de 110 V) en las mediciones de tensión.

Finalmente, se obtuvieron 39 000 registros validos (89.31 %) para la sección Izquierda y 36 336 (83.21 %) para la sección Derecha, sin contar datos nulos y anomalías (Fig. 87)

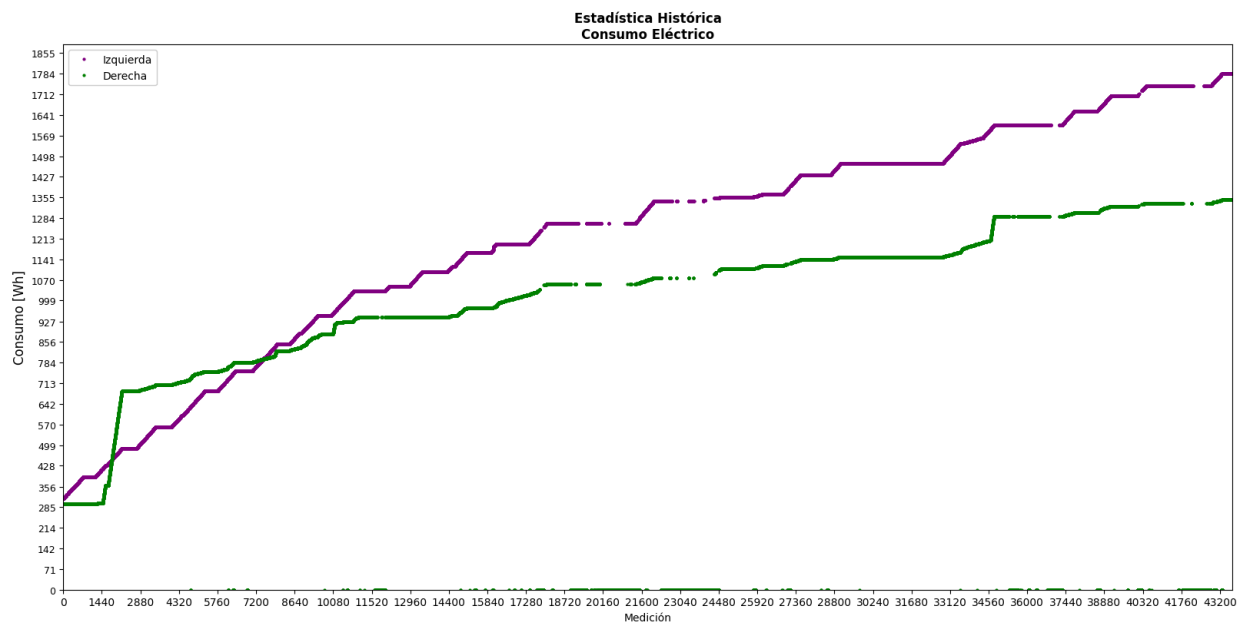
### Figura 87

*Estadística histórica de los datos validos de la implementación*

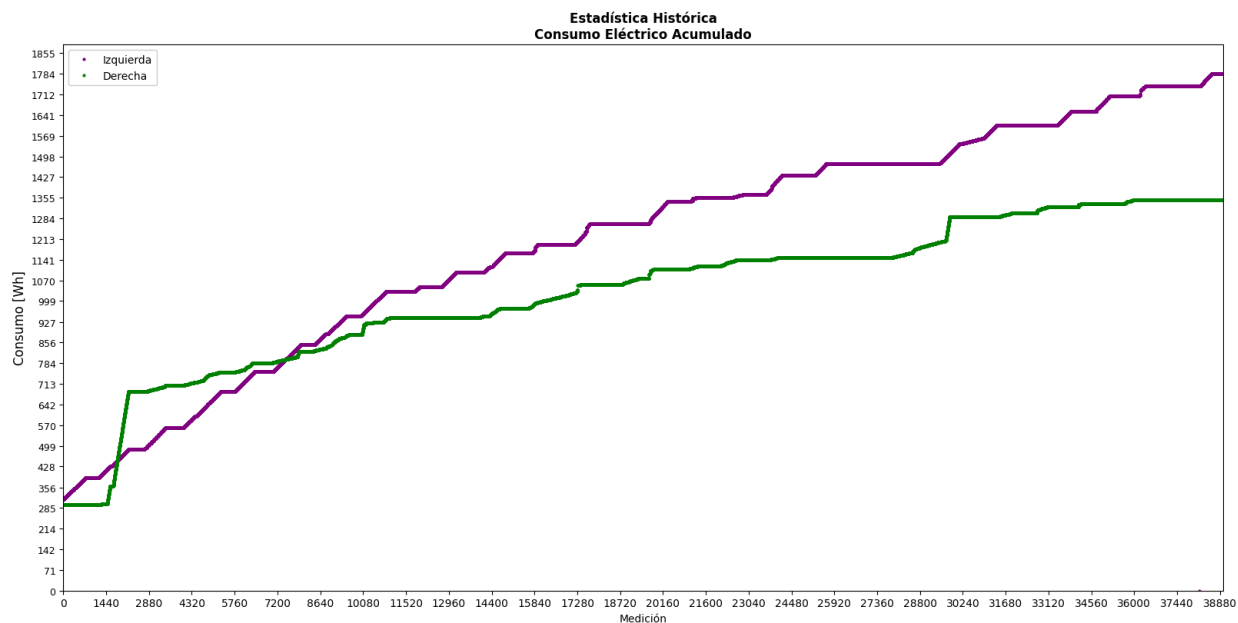


**Nota:** Se muestran todas las mediciones validas, que no fueron nulas ni anomalías.

Para el consumo eléctrico se presenta la gráfica del total de datos obtenidos en la implementación (Fig. 88) y la gráfica del consumo acumulado sin contar datos nulos (Fig. 89). El consumo eléctrico reportado en los 31 días de la implementación fue 1 784 Wh para la sección Izquierda y 1 347 Wh para la sección Derecha. La gráfica de consumo no inicia desde 0 Wh debido a un fallo del servicio de Webhook el primer día de la implementación, lo cual se explica mas adelante. Sin embargo, el medidor eléctrico almacena el valor del consumo eléctrico de forma no volátil por lo que fallos como el mencionado no afectan la adquisición de las variables eléctricas, y por lo tanto, al retornar la conexión con los servicios de Nube, reporta el valor almacenado del consumo eléctrico.

**Figura 88***Estadística histórica del consumo eléctrico*

**Nota:** Se muestra todo el conjunto de mediciones obtenidos para el consumo eléctrico

**Figura 89***Estadística histórica del consumo eléctrico acumulado*

**Nota:** Se muestran todas las mediciones validas que no fueron nulas

## **Análisis de la Implementación**

La implementación, en forma general, se considera exitosa al evidenciar el funcionamiento y operación del sistema de telegestión IoT y validar experimentalmente el prototipo en aplicaciones reales. Se logró realizar una adquisición y procesamiento adecuada de las variables eléctricas, obteniendo resultados verídicos y confiables los cuales evidencian que el sistema de telegestión IoT, manteniendo la esencia del diseño pero claramente realizando mejoras en el desarrollo y montaje físico, es susceptible de ser aplicado en entornos prácticos para la gestión del consumo eléctrico en instalaciones BT-UG.

Referente al prototipo desarrollado, en la implementación se evidenciaron cuatro situaciones específicas que se deben analizar detalladamente:

### ***Eficiencia de Registro***

De los 972 registros faltantes, 813 no se registraron debido a que en el primer día de la implementación, el servidor del servicio de Webhook, que enlaza el controlador electrónico del AP/Gateway de Perímetro con el archivo de registro de Google Sheets, estuvo en mantenimiento y por lo tanto no se pudo acceder al servicio.

Para los restantes 159 registros faltantes, se encontró que la mayoría se registraron en la microSD del Datalogger del AP/Gateway de Perímetro, pero el registro estaba *EMPTY* lo cual significa que el Tomacorriente Inteligente no realizó el envío de información para esos registros, y por lo tanto al estar prácticamente vacíos, no se registraron en el archivo de Registro.

Por lo tanto, sin contar los 813 registros faltantes debido a una falla de terceros, propiamente el sistema de telegestión IoT tuvo una eficiencia del 99.64 % con una pérdida de registros del 0.36 %.

Lo anterior evidencia la alta eficiencia y el correcto desarrollo y desempeño en la red de comunicaciones y en la gestión de la información del sistema de telegestión IoT. Lo anterior se traduce en que el montaje del prototipo, el diseño de la red de comunicaciones IoT y el desarrollo realizado en los archivos de Información tienen una alta eficiencia relacionada con la gestión de la información, desde la obtención de los datos en el procedimiento de sensado hasta los procesos de registro, almacenamiento, procesamiento y análisis en los servicios de Nube.

### ***Montaje del Prototipo***

De la situación anterior, se realiza el análisis de las causas de los registros faltantes, nulos y las anomalías presentadas.

Para los registros que se consideran nulos, debido a que los valores de tensión, corriente, potencia y consumo fueron 0, lo que se traduce en una falla en el sistema de telegestión IoT, se encontró que la causa fue unas conexiones deficientes del cableado electrónico que comunica los medidores eléctricos con el controlador electrónico del Tomacorriente Inteligente. Debido al uso de conectores Dupont, los cables, cuando se movía el Tomacorriente Inteligente, dejaban de hacer contacto con los *Headers* del controlador electrónico, por lo que no se recibía los datos de las variables eléctricas desde el medidor eléctrico, y lo cual se tradujo en registros nulos. Por lo tanto, debido a esos registros nulos, el consumo eléctricos puede haber sido menor que el real.

En cuanto a las anomalías, valores de tensión entre 30 y 110 V, aunque no se puede determinar su causa específica sin un mayor análisis de la situación, se hipotetiza que se produjeron debido a una falencia en la conexión del Tomacorriente Inteligente a la red eléctrica. Se observó varias veces la ocurrencia de una desactivación y activación instantánea de los relés del Tomacorriente Inteligente, lo cual generaba un apagado momentáneo de los aparatos

eléctricos conectados. No obstante, esta situación se derivaba de una desactivación momentánea del estabilizador de tensión al cual estaba conectado el Tomacorriente Inteligente, adicional que otros dispositivos (como el teclado y el ratón del equipo de computo) que estaban conectado directamente a ese estabilizador, sufrían el mismo problema que el Tomacorriente Inteligente. Aunque los componentes electrónicos del Tomacorriente Inteligente no se veían afectados por la desactivación del estabilizador, debido a los condensadores de la fuente DC del Tomacorriente Inteligente, el medidor eléctrico podía detectar una bajada de la tensión producto de la desactivación del estabilizador, y por lo tanto, debido a la condición crítica de baja tensión, se desactivaran momentáneamente los relés del Tomacorriente Inteligente.

Lo anterior, de ser así, muestra el correcto funcionamiento de las acciones automatizadas de protección del Tomacorriente Inteligente, pero también una posible falencia en el montaje físico o en las conexiones eléctricas, pues esas ocurrencias de desactivación pueden afectar los equipos electrónicos que se conecten al Tomacorriente Inteligente. Por lo tanto, se debe analizar a futuro esta situación para implementar las respectivas mejoras.

A pesar de las situaciones anteriores, el montaje de todos los elementos del prototipo del sistema de telegestión IoT fue eficiente y óptimo para cumplir con los objetivos planteados para el proyecto y con los diferentes diseños realizados. Cada elemento, aunque con correcciones menores que se fueron haciendo durante la etapa de evaluación, cumplieron con los requerimientos, especificaciones, prestaciones y funciones establecidas en la etapa de diseño.

Finalmente, tanto para mejorar las fallas identificadas como para aumentar las prestaciones de los elementos del sistema de telegestión IoT, se propone, para desarrollos a futuro, que los montajes físico de los dispositivos electrónicos, como el Tomacorriente Inteligente, estén basado totalmente en PCB e impresión 3D para asegurar una mejor eficiencia en

cuanto a las conexiones eléctricas, electrónicas y de comunicaciones, al reducir el uso de conectores y cableado dentro del montaje. Adicional, realizar un trabajo mas robusto en el diseño electrónico y la programación de los algoritmos para que el sistema de telegestión IoT, de forma automatizada, pueda detectar, tratar y corregir fallas como las presentadas anteriormente.

### ***Servicios de Nube***

La gran mayoría de los registros faltantes, el 83.64 %, se debió a una condición de terceros. Por lo tanto, es importante analizar la cuestión de cual opción es mas eficiente para soluciones tecnológicas basadas en el IoT: desarrollar propiamente los servicios de Nube o adquirir servicios de terceros.

Para el proyecto, los servicios de Nube terceros, que fueron todos (aplicación móvil, plataforma IoT, archivos de información, almacenamiento de archivos en Nube, Webhook) ayudaron al rápido y óptimo desarrollo del prototipo, adicional que el trabajo estuvo totalmente enfocado hacia las necesidades propias de la solución tecnológica. No obstante, la situación presentada con el servicio de Webhook evidencia la desventaja crítica de usar servicios de terceros, pues estos pueden fallar en su infraestructura o procesos de red, dejar de ser accesibles durante un tiempo, o inclusive dejar de funcionar permanentemente, lo cual afectaría negativa y críticamente las soluciones tecnológicas que dependan de ellos.

Ya pensando en el ámbito comercial, es importante, en lo posible, desarrollar servicios propios e integrados para mitigar esa desventaja. Y en caso de elegir usar servicios de terceros, implementar, desde el diseño y desarrollo del producto, medidas en caso de que los servicios de terceros dejen de funcionar, ya sea a través de la migración a otros proveedor de servicios o brindándole la posibilidad al usuario de una gestión directa del producto para que este pueda

seguir funcionando sin necesidad de pasar por los servicios de terceros, aunque claramente con la desventaja de que dichos servicios (sean de visualización, registro y almacenamiento de datos, análisis, etc.) ya no se podrían usar.

### ***IoT***

El prototipo desarrollado evidencia científica, experimental y tecnológicamente las ventajas y prestaciones que ofrecen los sistemas y soluciones tecnológicas basados en IoT. La diferencia entre tener un dispositivo de gestión del consumo eléctrico a tener un sistema de telegestión IoT es amplia. El primero se limitará medir y/o controlar el consumo eléctrico como sucede con la mayoría de modelos comerciales de tomacorrientes, interruptores y tableros inteligentes. Sin embargo, un sistema integrado de telegestión basado en el IoT aumenta las prestaciones de estos dispositivos, agregando múltiples funciones como las encontradas en el prototipo desarrollado: automatización y control electrónico inteligente de los procedimientos relacionados con las variables eléctricas; protección automatizada contra diferentes situaciones críticas que se puedan presentar; visualización de estados e información *in situ*, local y remota; gestión en Nube de la información y de datos masivos (registro, almacenamiento, procesamiento y análisis); automatización de procesos reduciendo la incidencia operativa de las personas; y acceso desde cualquier ubicación geográfica y dispositivo con acceso a Internet, sea fijo o móvil, y por múltiples usuarios.

Por lo tanto, se evidencia con los resultados obtenidos en el proyecto y con las mejoras que se pueden realizar, el sistema de telegestión IoT para tomacorrientes en instalaciones BT-UG aporta eficiente y ampliamente para que los usuarios cuenten con una herramienta completa e integrada para la gestión energética de la instalación y de los aparatos eléctricos. Claramente, y al



estar encaminado con diferentes objetivos y políticas de gestión energética a través de sistemas y dispositivos inteligentes, el sistema de telegestión IoT ayuda a mejorar los indicadores de eficiencia e intensidad energética, y al Uso Responsable y Eficiente de la Energía (URE).

## Discusión y Conclusiones

A través del proyecto desarrollado, se concretó el diseño, desarrollo y evaluación de un prototipo del sistema de telegestión IoT para tomacorrientes de 120 V 15 A, siendo adaptable para trabajar en redes eléctricas de hasta 240 V 20 A, cumpliéndose con los objetivos propuestos a través del desarrollo del prototipo del Tomacorriente Inteligente, la implementación de una arquitectura de red basada en IoT con un escalamiento a través de la agregación del AP/Gateway de Perímetro, y la validación experimental del prototipo del sistema de telegestión IoT.

El prototipo desarrollado generó una solución alternativa a la problemática identificada para el proyecto encaminándose con la adopción de nuevas tecnologías de uso, medición y análisis orientadas a la eficiencia energética planteada en el Plan Energético Nacional (PEN) 2020-2050. Igualmente, a través del prototipo desarrollado, se solucionaron diferentes falencias observadas en los antecedentes y modelos comerciales estudiados. Dentro de las mejoras realizadas se destacaron:

Un Tomacorriente Inteligente doble que habilita la conexión de dos aparatos en simultaneo y reduce la cantidad necesaria de TI para cubrir la totalidad de los tomacorrientes fijos de una instalación.

El medidor eléctrico PZEM-004T-100A para la medición de las variables de tensión y corriente lo cual eliminó el error sistemático que se evidenció en varios de los antecedentes al tomar como constante el valor nominal de la tensión de la red eléctrica. En la evaluación del prototipo se demostró que este valor no es constante sino puede variar, por lo tanto la necesidad de sensarlo para obtener un calculo mas exacto de la potencia y el consumo eléctrico. Adicional, el calculo de la potencia activa y consumo eléctrico a través del método acumulativo instantáneo

aumenta la exactitud de los datos entregados.

El escalamiento realizado con el AP/Gateway de Perímetro para la gestión de los Tomacorrientes Inteligentes, que reduce la cantidad de conexiones inalámbricas individuales del WAP, adicional que minimiza el riesgo de la saturación del ancho de banda y del canal inalámbrico.

Con la arquitectura de red IoT se aprovecharon las ventajas de computación en Perímetro (Niebla) y en Nube, lo cual aumenta la eficiencia, optimización y prestaciones del sistema de telegestión IoT frente a otras soluciones tecnológicas. Adicional, que se ofrece un acceso remoto al sistema de telegestión IoT desde cualquier ubicación geográfica y dispositivo a través de Internet.

Los servicios de Nube ofrecieron una gestión de la información eficiente. A través de la aplicación móvil, la plataforma IoT y los archivos de información, el usuario puede supervisar en tiempo real y de forma histórica el estado y las variables eléctricas de los Tomacorrientes Inteligentes.

Sin embargo, debido a la imposibilidad de realizar la evaluación del prototipo en un laboratorio controlado, calibrado y certificado, se presentaron diferentes errores sistemáticos a los cuales se logró dar un tratamiento adecuado para la reducción del impacto e incidencia de dichos errores en los procesos de medición y evaluación. Sin embargo es importante resaltar que, para una mayor exactitud de los resultados en cualquier actividad de investigación y desarrollo tecnológico, se debe procurar que los procesos de evaluación se realicen en laboratorios controlados, calibrados y certificados con el fin de eliminar, o por lo menos reducir, la incidencia

de los diferentes errores sistemáticos que se puedan presentar.

Los resultados obtenidos en la evaluación e implementación del prototipo se consideran exitosos gracias al tratamiento que se les dio a los errores sistemáticos identificados. Adicional, los resultados obtenidos demostraron la confiabilidad y funcionalidad del sistema de telegestión IoT para la gestión energética de las tomacorrientes y aparatos eléctricos en instalaciones BT-UG. Se demostró que el medidor eléctrico PZEM-004T-100A presenta, de forma general, una alta precisión en las mediciones de las variables eléctricas y un correcto desempeño en su funcionamiento y operación, por lo tanto, el sistema de telegestión IoT es confiable para ser implementado en los diferentes sectores eléctricos del país realizándole las respectivas mejoras funcionales y estructurales.

Se evidenció que el principal sector que se beneficiaría a futuro con el sistema de telegestión IoT es el sector terciario debido a las políticas que le obligan a cumplir con unos indicadores de gestión energética. Así, con el sistema de telegestión IoT, los usuarios de este sector tendrían una herramienta inteligente que les ayudaría a aumentar la eficiencia energética de sus instalaciones; a reducir el consumo de sus aparatos eléctricos y por lo tanto de la intensidad energética, y a cumplir con las políticas del URE, lo anterior gracias a las prestaciones y naturaleza propia del sistema de telegestión IoT que les proveería a los usuarios con información óptima y precisa sobre el comportamiento del consumo de los aparatos eléctricos. Por lo tanto, se concluye que el sistema de telegestión IoT puede ser aplicado para la gestión energética de tomacorrientes en los cuales se conectan aparatos eléctricos de alta potencia (refrigeración, ventilación, calefacción, aire acondicionado, equipos de sonido), equipos eléctricos y electrónicos de uso continuo (equipos de computo, televisión, dispositivos de red, sistemas de seguridad, iluminación) y en aparatos eléctricos con alto riesgo eléctrico (equipos industriales, motores

eléctricos, equipos de laboratorio).

Una aplicación particular que puede tener el sistema de telegestión IoT es en la complementación de las redes eléctricas inteligentes en la etapa de generación eléctrica, especialmente para los usuarios autogeneradores o de generación a pequeña escala basada en Energías Renovables No Convencionales (ERNC) los cuales requieren un aprovechamiento preciso y óptimo de la energía eléctrica. Así, el sistema de telegestión IoT les ayudaría a optimizar la generación, distribución y uso de la energía eléctrica.

Como valor agregado al proyecto, se realizan unas recomendaciones sobre el desarrollo realizado:

- I. Dentro las mejoras que se pueden realizar al sistema de telegestión IoT, se recomienda el uso de circuitos PCB e impresión 3D para optimizar y mejorar el montaje del Tomacorriente Inteligente y el AP/Gateway de Perímetro en búsqueda de la compactación de los componentes, la reducción del tamaño de los montajes y el cumplimiento de las normatividad técnica frente al diseño industrial y la protección ambiental de estos componentes.
- II. Otras mejoras funcionales y estructurales que se consideran incluyen el uso o desarrollo de una plataforma IoT mas robusta para los servicios de Nube y la gestión de la información, el desarrollo de una aplicación propia para el sistema de telegestión IoT y la inclusión de funciones adicionales (Ej. Alertas) para los procesos supervisión y el monitoreo.
- III. Se recomienda aprovechar los resultados obtenidos para seguir la línea de investigación del proyecto con el fin de desarrollar un producto comercial que sea susceptible de implementarse en diferentes instalaciones BT-UG, especialmente las del sector terciario.

- IV. Se recomienda aprovechar los resultados obtenidos para investigar y desarrollar nuevos sistemas o dispositivos de gestión energética, basados en el sistema de telegestión IoT desarrollado, que puedan aprovecharse en otras aplicaciones (ej. SEM o tablero eléctricos) en el sector eléctrico.
- V. Se recomienda a las instituciones publicas, centros educativos, a todos los sectores económicos y a la población en general, promover, incentivar y normalizar el uso de sistemas inteligentes para la gestión energética a nivel nacional, pues con el proyecto desarrollo se evidenció el impacto positivo que tienen estos sistemas inteligentes en pro de la mejora de la eficiencia energética, la reducción de la intensidad energética, el Uso Racional y Eficiente de la Energía, y el consumo sostenible y responsable de la energía eléctrica.

Finalmente, el prototipo desarrollado cumplió con su fin de establecer una evidencia y antecedente científico y tecnológico para el desarrollo a futuro de un sistema comercial de telegestión IoT para los tomacorrientes y aparatos de las redes eléctricas de 120 a 240 V 15/20 A en las instalaciones BT-UG de Colombia. Así, a partir del diseño base realizado, e introduciendo las respectivas mejoras funcionales y estructurales, es viable la conversión del sistema de telegestión IoT en un producto comercial que brinde a los diferentes usuarios y sectores una alternativa tecnológica que les ayude en el cumplimiento de la políticas de eficiencia e intensidad energética, Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE), y el consumo responsable y sostenible de la energía eléctrica.

## Referencias

- Abed, I. & Naser, H. (2020). ESP32 Microcontroller Based Smart Power Meter System Design and Implementation. *Al-Rafidain Engineering Journal*, 25(2), 136-143.  
[https://www.researchgate.net/publication/347293888\\_ESP32\\_Microcontroller\\_Based\\_Smart\\_Power\\_Meter\\_System\\_Design\\_and\\_Implementation](https://www.researchgate.net/publication/347293888_ESP32_Microcontroller_Based_Smart_Power_Meter_System_Design_and_Implementation)
- Akbar, M., Wilantara, P., Ikhsan, M., Ikhtiarta, H., Siskandar, R., Novianty, I. & Husein, I. (2019). The assembling of electrical socket for electricity usage monitor and electronic device control with ESP8266 microcontroller basis. *AIP Conference Proceedings*, 2169(1), 030002. [https://www.researchgate.net/publication/337104570\\_The\\_assembling\\_of\\_electrical\\_socket\\_for\\_electricity\\_usage\\_monitor\\_and\\_electronic\\_device\\_control\\_with\\_ESP8266\\_microcontroller\\_basis](https://www.researchgate.net/publication/337104570_The_assembling_of_electrical_socket_for_electricity_usage_monitor_and_electronic_device_control_with_ESP8266_microcontroller_basis)
- Alcaldía-de-Bogotá. (2021). *Documentos para Energía Eléctrica-Usos Racional y Eficiente*.  
<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/listados/tematica2.jsp?subtema=24354>
- Alexander, C. K. & Sadiku, M. N. O. (2006). *Fundamentos de Circuitos Eléctricos 3ra Ed.* McGraw Hill/Interamericana Editores de México.
- Allegro-Microsystems. (2022). *Hall-Effect Sensors*.  
<https://www.allegromicro.com/en/insights-and-innovations/technical-documents/hall-effect-sensor-ic-publications/allegro-hall-effect-sensor-ics>
- Alonso-Villegas, Y. (2021). *Proyecto Alfa Free One*. <https://www.reexunad.com/paf-acerca-de>
- Ambardar, A. (2002). *Procesamiento de señales analógica y digitales 2da Ed.* International Thompson Editores.

- Ardila, A. M. (2007). *Física Experimental 2da Ed.* Universidad Nacional de Colombia.  
[http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/Facultad\\_de\\_Ciencias/Publicaciones/Imagenes/Portadas\\_Libros/Fisica/Fisica\\_experimental\\_I/FisicaExperimental.pdf](http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/Facultad_de_Ciencias/Publicaciones/Imagenes/Portadas_Libros/Fisica/Fisica_experimental_I/FisicaExperimental.pdf)
- Arévalo-López, J. A. (2020). *Implementación de un sistema de reconocimiento de hábitos de consumo de energía eléctrica en hogares.* Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Colombia. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1225>
- AspenCore. (2022a). *Electromagnetic Induction.*  
<https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/electromagnetic-induction.html>
- AspenCore. (2022b). *Hall Effect Sensor.*  
<https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>
- BIPM. (2022). *The International System of Units (SI): Base units.*  
<https://www.bipm.org/en/measurement-units/si-base-units>
- Blynk. (2022). *Blynk.* <https://blynk.io/>
- Bustos, J. S. (2021). Análisis de datos con medida inteligente AMI. *Documentos de Trabajo ECBTI, 1(2), 2-3.*  
<https://doi.org/https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/wpecbti/article/view/4362>
- Carmona, M., Bosch, J., Gómez, J. & López, M. (2012). *Instrumentación Electrónica Avanzada. Instrumentación Inteligente 1ra Ed.* Departament d'Electrònica, Universitat de Barcelona.  
<http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/34483/1/Instrumentaci%C3%B3n%20Electr%C3%B3nica%20Avanzada-Instrumentaci%C3%B3n%20Inteligente.pdf>
- CEM. (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados 3ra Ed.* Ministerio de Industria, Energía y Turismo. España.  
<https://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>



Chen, W.-K. (2004). *The Electrical Engineering Handbook 1st Ed.* Elsevier USA.

CISCO-Networking-Academy. (2019). *Introduction to IoT (Curso)*.

<https://www.netacad.com/es/courses/iot/introduction-io>

CODENSA. (2015). *Generalidades 7.1 . Acometidas eléctricas y medidores*.

[https://likinormas.micodensa.com/Norma/acometidas\\_medidores/generalidades\\_ae/generalidades\\_7\\_1\\_actualizacion\\_generalidade](https://likinormas.micodensa.com/Norma/acometidas_medidores/generalidades_ae/generalidades_7_1_actualizacion_generalidade)

Compton, K., Shakib, T. & Pelino, M. (2015). *Introducing the Cisco IoT System*.

[https://www.cisco.com/c/dam/en\\_us/training-events/le21/onlineevts/assets/docs/Accelerate\\_Your\\_Business\\_with\\_the\\_Cisco\\_IoT\\_System\\_external.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/en_us/training-events/le21/onlineevts/assets/docs/Accelerate_Your_Business_with_the_Cisco_IoT_System_external.pdf)

Elkor-Technologies. (2006). *AN0305. Introduction to Current Transformers*. Elkor Technologies

Inc. [https://www.elkor.net/pdfs/AN0305-Current\\_Transformers.pdf](https://www.elkor.net/pdfs/AN0305-Current_Transformers.pdf)

Endesa. (2021). *¿Cómo saber cuánta electricidad gasta tu casa?*

<https://www.endesa.com/es/conoce-la-energia/blog/cuanta-luz-consume-casa>

ENEL. (2018). *Medición Inteligente*. <https://www.enel.com.co/es/medicion-inteligente.html>

Escobar, A. & Torres, F. A. (2015). *Análisis geométrico de los sistemas eléctricos simétricos y*

*asimétricos para N - Fases*. Universidad Pedagógica Nacional. Colombia.

<http://repository.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/2112>

Espinoza-Montes, C. (2010). *Metodología de investigación tecnológica 1ra Ed.* Autor editor.

Espressif. (2022). *Documentación de referencia de los SoC ESP32*. Espressif.

<https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents>

Flores-Figueroa, J., Romero-Ochoa, M., M. A. abd Soto-Rodriguez & Vazquez-Palma, M. G.

(2018). *Diseño de un medidor de energía eléctrica bidireccional y monitoreado mediante*

- aplicación móvil. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Computacionales e Informática*, 7(14), 1-30. <https://doi.org/https://doi.org/10.23913/reci.v7i14.84>
- Fundación-Endesa. (2022). *Telegestión*.  
<https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/telegestion>
- García-Herrera, J. Y. F. (2018). *Orientaciones para la construcción de viviendas inteligentes en Colombia basada en el Internet de las Cosas*. Universidad Autónoma de Bucaramanga. Colombia. [https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/3545/2018\\_Tesis\\_Garcia\\_Herrera\\_Jose%20Yon%20Frans.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/3545/2018_Tesis_Garcia_Herrera_Jose%20Yon%20Frans.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Granda, M. & Mediavilla, E. (2010). *Instrumentación electrónica: Transductores y Acondicionadores de Señal 1ra Ed.* PubliCan Edicionales de la Universidad de Cantabria.
- Herrera-Heredia, E. A. & Chávez-Enríquez, A. S. (2020). *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*. Universidad de las Fuerzas Armadas. Ecuador.  
<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/23119/2/ESPEL-EMI-0396-P.pdf>
- Ibáñez-Gudiño, D. V. (2019). *Desarrollo de un prototipo de medidor avanzado de consumo eléctrico en el hogar*. Universitat Politècnica de València. España.  
<http://hdl.handle.net/10251/128661>
- ITU. (2012). *Recomendación ITU-T Y.4000/Y.2060 (06/2012) Visión general de la Internet de las cosas*. <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=11559&lang=es>
- Jiménez, J. (2021). *Redes WiFi. Cuántos dispositivos puedo conectar al Wi-Fi como máximo*.  
<https://www.redeszone.net/tutoriales/redes-wifi/dispositivos-maximo-conectar-wifi/>

Kadala, S. K., Rajagiri, A. K., Ajitha, A. & Thalluri, A. K. (2021). Development of an IoT based solution for Smart Distribution Systems.

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9375639>

Maghfiroh, H., Affandy, J., Adriyanto, F. & Nizam, M. (2021). Single Phase Inverter with Power Monitoring using Arduino. *Journal of Physics: Conference Series*, 1844(1), 012016.

[https://www.researchgate.net/publication/350297271\\_Single\\_Phase\\_Inverter\\_with\\_Power\\_Monitoring\\_using\\_Arduino](https://www.researchgate.net/publication/350297271_Single_Phase_Inverter_with_Power_Monitoring_using_Arduino)

MinEnergía. (2013). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)*. Ministerio de Minas y Energía. Colombia.

<https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/1179442/Anexo+General+del+RETIE+vigente+actualizado+a+2015-1.pdf/57874c58-e61e-4104-8b8c-b64dbabedb13>

MinEnergía. (2022). *ABC sobre Infraestructura de Medición Avanzada (AMI)*.

<https://www.minenergia.gov.co/infraestructura-de-medicion-avanzada>

Moreno-Quizhpe, A. B. (2018). *Diseño y construcción de un prototipo de medición y control de consumo de energía eléctrica para dispositivos domésticos*. Universidad Católica de Loja.

Ecuador. <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/20.500.11962/23503/1/Moreno%20Quizhpe%20Alex%20Bryan.pdf>

NEU. (2022). *El Smart Meter realmente inteligente*. <https://www.neu.com.co/tech>

Nino-Vega, J. A., Fernández-Morales, F. H. & Duarte, J. E. (2019). Diseño de un recurso educativo digital para fomentar el uso racional de la energía eléctrica en comunidades rurales. *Saber, Ciencia y Libertad*, 14(2), 256-272.

<https://doi.org/https://doi.org/10.18041/2382-3240/saber.2019v14n2.5889>

ONU. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

OpenEnergyMonitor. (2022). *Open Energy Monitor*. <https://openenergymonitor.org/>

Palavecino, N., Seeber, L. & Herrer, S. (2018). *Adaptador inteligente para medición y control de consumo eléctrico de electrodomésticos*. Instituto Tecnológico de Buenos Aires.

Argentina. <https://ri.itba.edu.ar/bitstream/handle/123456789/1648/FLUXUS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Poma-Aliaga, L. F. (2017). *Diseño de un sistema inteligente de ahorro de energía eléctrica*.

Pontificia Universidad Católica. Perú.

<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/9116>

Poyser, A. W. (1892). *Magnetism and Electricity: A Manual for Students in Advanced Classes*.

Longmans, Green, Company.

[https://archive.org/details/bub\\_gb\\_JzBAAAAAYAAJ/page/n5/mode/2up](https://archive.org/details/bub_gb_JzBAAAAAYAAJ/page/n5/mode/2up)

PZEM. (s.f.). *Manuales del PZEM-004T*.

[https://www.circuitspecialists.com/content/189799/ac004.pdf%20https://innovatorsguru.com/wp-content/uploads/2019/06/PZEM-004T-V3.0-Datasheet-User-](https://www.circuitspecialists.com/content/189799/ac004.pdf%20https://innovatorsguru.com/wp-content/uploads/2019/06/PZEM-004T-V3.0-Datasheet-User-Manual.pdf)

[Manual.pdf](https://www.circuitspecialists.com/content/189799/ac004.pdf%20https://innovatorsguru.com/wp-content/uploads/2019/06/PZEM-004T-V3.0-Datasheet-User-Manual.pdf)

Ramírez-Madrid, D. A. (2018). *Metodología para la implementación de IoT*. Universidad

Distrital Francisco José de Caldas. Colombia. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13742/RamirezMadridDavidAndres2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rashid, A. & Handhal, F. (2017). A prototype Design for Three Phase Smart Energy Meter.

[https://www.researchgate.net/publication/322600236\\_A\\_prototype\\_Design\\_for\\_Three\\_Phase\\_Smart\\_Energy\\_Meter](https://www.researchgate.net/publication/322600236_A_prototype_Design_for_Three_Phase_Smart_Energy_Meter)

- Rodríguez-Litardo, V. M. & Luna-Cruz, J. G. (2019). *Diseño de un sistema inteligente para monitoreo y control de consumo eléctrico en residencias*. Universidad de Guayaquil. Ecuador. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/45166>
- Rodríguez-Moreno, E. S. & López-Ordoñez, V. F. (2017). *Diseño e implementación de un sistema inteligente para un edificio mediante IoT utilizando el protocolo de comunicación LoRaWAN®*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/7394/RodriguezMorenoEdwardStiven2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Romero-Gaibor, E., Guerra-Salazar, J., Tapia-Segarra, I., Morales-Gordon, J. & Ramírez-Chinlli, E. J. (2018). Implementación de un prototipo de medidor de energía eléctrica residencial considerando la reducción de pérdidas no técnicas por hurto. *Revista Publicando*, 5(15), 66-82. <https://revistapublicando.org/revista/index.php/crv/article/view/1219>
- SonOff. (2022). *Products Smart Plug*. <https://sonoff.tech/products/>
- Soria, E., Martín-Guerrero, J. D. & Gómez-Chova, L. (2004). *Teoría de Circuito*. McGraw-Hill/Interamericana de España.
- Steren. (2022). *Contacto Wi-Fi con medidor de consumo eléctrico*. <https://www.steren.com.co/contacto-wi-fi-con-medidor-de-consumo-electrico.html>
- Téllez-Gutiérrez, S. M., Rosero-García, J. & Céspedes-Gandarillas, R. (2018). Sistemas de medición avanzada en Colombia: beneficios, retos y oportunidades. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(2), 469-488. <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/v36n2/2145-9371-inde-36-02-469.pdf>

- Tobi, M. & Van Harling, V. (2021). Wireless electric energy transmission system and its recording system using PZEM004T and NRF24L01 module. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 21(3), 1372-1380. [https://www.researchgate.net/publication/349697502\\_Wireless\\_electric\\_energy\\_transmission\\_system\\_and\\_its\\_recording\\_system\\_using\\_PZEM004T\\_and\\_NRF24L01\\_module](https://www.researchgate.net/publication/349697502_Wireless_electric_energy_transmission_system_and_its_recording_system_using_PZEM004T_and_NRF24L01_module)
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas 4ta Ed.* Pearson Educación.
- Torres-Payoma, F. A. (2019). *Investigación del efecto de la distancia entre detectores en la técnica de retrodispersión de neutrones térmicos.* Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76009>
- Tumanski, S. (2006). *Principles of Electrical Measurement.* CRC Press USA.
- UNAD. (2022). *Acerca de ECBTI.* <https://academia.unad.edu.co/ecbti/acerca-de-la-escuela>
- UNAD. (s.f). *Instrumentación y Mediciones.* Programa de Ingeniería Electrónica UNAD. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/4960/201455.pdf>
- UPME. (2016). *Smart Grids Colombia. Visión 2030.* UPME. <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Smart-Grids-Colombia-Visi%C3%B3n-2030.aspx>
- UPME. (2019). *Plan Energético Nacional 2020-2050. Documento de consulta.* [https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN\\_documento\\_para\\_consulta.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf)
- Urbano, C. A. & Yuni, J. A. (2006). *Técnicas para investigar: recursos metodológicos para la preparación de proyectos de investigación 2da Ed.* Editorial Brujas.
- Vango. (2016). *V9881D Datasheet.* <https://blog.danman.eu/wp-content/uploads/2020/12/v98xx.pdf>

VIU. (2015). *¿Qué es el proceso tecnológico y cuales son sus fases?*

<https://www.universidadviu.com/co/actualidad/nuestros-expertos/que-es-el-proceso-tecnologico-y-cuales-son-sus-fases>

VTA. (2019). *Manual de Usuario VTA-8463*.

[https://www.vta.co/wp-content/uploads/2019/09/VTA-84630\\_manual\\_bn.pdf](https://www.vta.co/wp-content/uploads/2019/09/VTA-84630_manual_bn.pdf)

## Anexos

### Anexo 1. Divulgación Científica del Proyecto

#### I. **Documento técnico:** Documento técnico “Proyecto Alfa Free Two (PAFT)”

#### **Figura 90**

*Portada del Documento Técnico del prototipo desarrollado*

# Proyecto Alfa Free Two - PAFT

DOCUMENTO TÉCNICO

Yiosef Alonso Villegas

Versión 1.0

19 de marzo de 2022



## II. Ponencia:

### Figura 91

*Certificado Ponencia Expotech 2021*



## III. Artículo: Artículo en revista Publicaciones e Investigación

### Figura 92

*Artículo publicado en la revista Publicaciones e Investigación*



<sup>1</sup>Yiosef Alonso Villegas, <sup>2</sup>Freddy Torres Payoma

<sup>1,2</sup>Universidad Nacional Abierta y a Distancia —UNAD—

Recibido: 10/15/2021 Aprobado 11/20/2021

#### IV. Contenido Virtual (Foro): Foro de Proyecto en Arduino Forum

**Figura 93**

*Foro técnico creado en Arduino Forum*

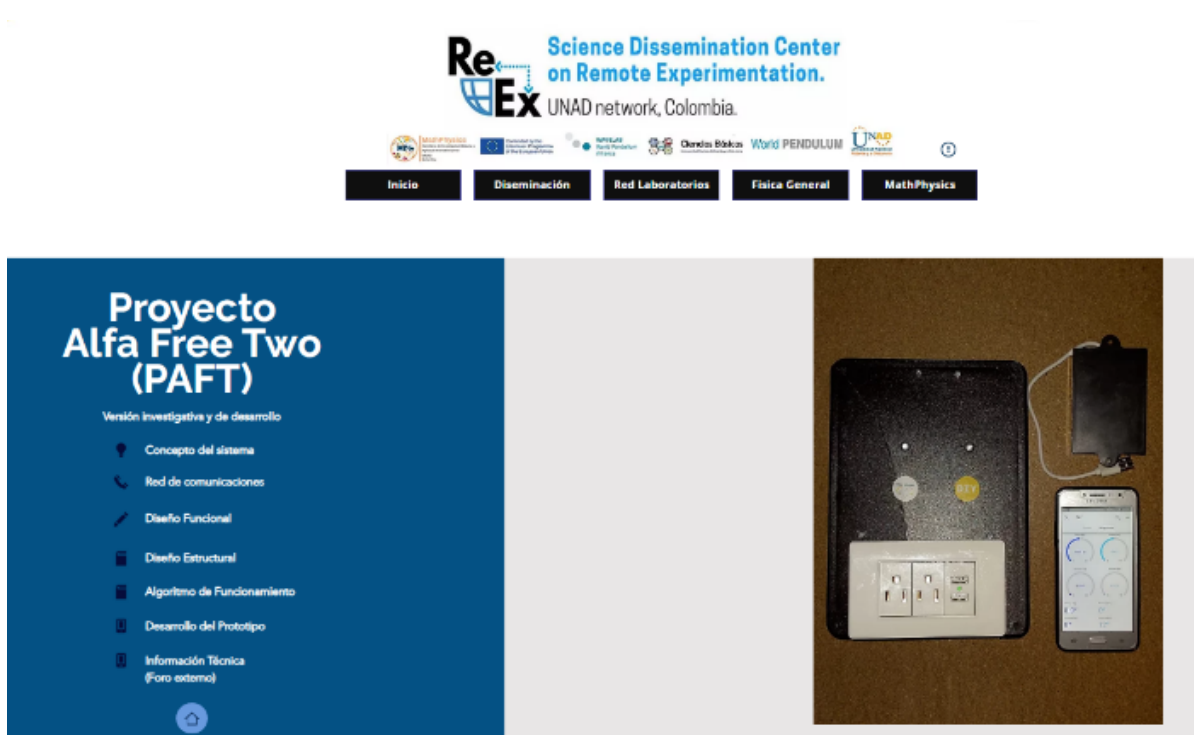


#### V. Contenido Virtual (Pagina Web):

Pagina Web del Proyecto Alfa Free - ReEx SDC UNAD

**Figura 94**

*Contenido virtual sobre el proyecto, desarrollado para la pagina web del SDC ReEx*



**VI. Resultados de la Evaluación:**

Archivos de Información de Registro, Procesamiento, Análisis y Evaluación (Google Drive)

**VII. Códigos de Software:**

Códigos fuente de controladores electrónicos y *Scripts* de automatización de procesos (Google Drive)

## Anexo 2. Ejemplo del método acumulativo horario para el cálculo del Consumo eléctrico

Sea un dispositivo de red residencial tipo módem, cuya resistencia eléctrica equivalente  $R_{eq}$  es de  $240 \Omega$  y se encuentra conectado a un tomacorriente de la red eléctrica de valor eficaz  $V_{rms}$  de 120 V.

Hallando el valor eficaz de la corriente  $I_{rms}$ , usando el modelamiento DC presentado en la Tabla 4 se tiene que:

$$I_{rms} = \frac{120 \text{ V}}{240 \Omega} = 0,5 \text{ A}$$

Por lo tanto, su potencia eléctrica  $P$  y su consumo por hora  $U_E(h)$ , son

$$P = 120 \text{ V} \cdot 0,5 \text{ A} = 60 \text{ W}$$

$$U_E(h) = 60 \text{ W} \cdot 1 \text{ h} = 60 \text{ Wh}$$

Al ser un dispositivo que brinda el acceso a Internet y WiFi, el módem permanece encendido durante un periodo de tiempo  $T = 24 \text{ h}$  al día durante los 30 días del mes. Por lo tanto, su consumo diario  $U_E(d)$  (teniendo en cuenta que 1 día = 24 h) y su consumo mensual  $U_E(m)$  (tomado como referencia 1 mes = 30 días) son:

$$U_E(d) = 60 \text{ Wh} \cdot 24 \text{ h} = 1440 \text{ Wh día}$$

$$U_E(m) = 1440 \text{ Wh día} \cdot 30 \text{ días} = 43200 \text{ Wh mes}$$

$U_E(m)$  en kWh es 43.2 kWh.

Suponiendo que, en pesos colombianos (COP), el precio de 1 kWh sea de COP 500, el

$U_E(m)$  del módem representará un costo mensual de

$$43,2 \text{ kWh mes} \cdot \text{COP } 500 = \text{COP } 21600$$

Supóngase ahora que se implementa un TI para medir y controlar el consumo eléctrico del módem con el fin de apagarlo en horas de la noche y cuando los habitantes no se encuentren en la vivienda. También gracias a la función de telemetría del dispositivo, se encuentra que el valor  $V_{rms}$  de la red eléctrica no es de 120 V sino en promedio de 118.6 V Hallando el nuevo valor de  $I_{rms}$

$$I_{rms} = \frac{118,6 \text{ V}}{240 \Omega} = 0,49 \text{ A}$$

Por lo tanto, su  $P$  y su  $U_E$ , serán

$$P = 118,6 \text{ V} \cdot 0,494 \text{ A} = 58,59 \text{ W}$$

$$U_E = 58,5884 \text{ W} \cdot 1 \text{ h} = 58,59 \text{ Wh}$$

Gracias al control remoto que se puede efectuar con el TI, el módem se puede apagar cuando no se esté utilizando, por lo que solo permanece encendido 10 h los lunes a los viernes y 17 h los sábados y los domingos para un periodo  $T$  aproximado de 360 h al mes, obteniendo un promedio equivalente de horas diarias  $\bar{h}$  de

$$\bar{h} = \frac{360 \text{ h}}{30 \text{ días}} = 12 \text{ h / día}$$

Para un  $U_E(d)$  y un  $U_E(m)$  de

$$U_E(d) = 58,6 \text{ Wh} \cdot 12 \text{ h} = 703,0608 \text{ Wh dia}$$

$$U_E(m) = 703,0608 \text{ Wh dia} \cdot 30 \text{ días} = 21,08088 \text{ kWh mes}$$

Por lo que el nuevo costo equivalente de  $U_E(m)$  es

$$21,08088 \text{ kWh mes} \cdot \text{COP } 500 = \text{COP } 10540$$

generando un ahorro exacto de COP 11 060 (51.2 %) gracias al sistema de gestión del TI.

### **Anexo 3. Ejemplo de la situación problema con la topología lógica de los Tomacorrientes**

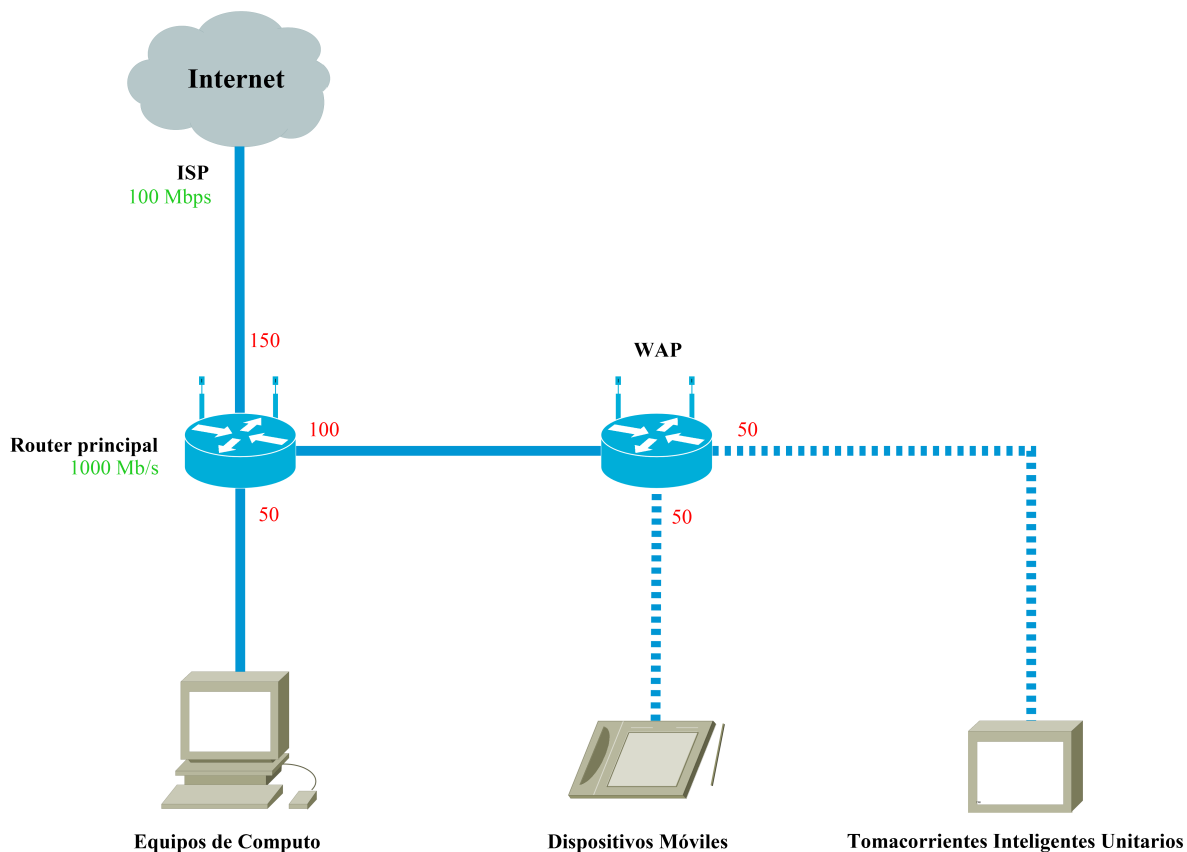
#### **Inteligentes**

Sea una universidad cuya sala de Internet cuenta con 50 computadores integrados (*All-in-One*). En búsqueda del cumplimiento de las políticas de gestión y ahorro energético, se ha decidido implementar un TI para cada computador por lo que se requerirán 25 TI dobles o 50 individuales para cubrir los 50 equipos de computo.

Buscando en el mercado nacional, se encontraron dos modelos comerciales nacionales de TI. Sin embargo, ambos modelos son tomacorrientes unitarios y se conectan directamente al WAP de la sala de Internet a través de WiFi. Por lo tanto se requerirían 50 TI para cubrir los 50 equipos de computo.

Ahora sean 50 estudiantes que están utilizando los 50 computadores, pero adicional cada estudiante cuenta con un *SmartPhone* los cuales se enlazan también inalámbricamente a través del WiFi de la sala de Internet. Por lo tanto, el WAP de la sala de Internet llegaría a tener 100 conexiones inalámbricas individuales (50 permanentes de los TIs + hasta 50 de los *SmartPhones*) por el mismo canal inalámbrico. Se ha comprobado que una cantidad alta de dispositivos conectados inalámbricamente a un mismo WAP genera una saturación, no solamente del canal inalámbrico, sino también del ancho de banda disponible, lo cual provoca interferencias o interrupciones en las comunicaciones (Jiménez, 2021). Esto es que si, por ejemplo, se tiene contratada a una ISP que brinda un plan de velocidad de transmisión de 100 Mbps por cada *router*, y este ofrece un ancho de banda Gigabit (1000 Mb/s), la velocidad de transmisión y el ancho de banda se dividirán en hasta 150 dispositivos (los 50 computadores y los dispositivos enlazados inalámbricamente al WAP) (Jiménez, 2021).

**Figura 95**  
*Problemática identificada para la red de comunicaciones*



**Nota:** Cada TI significa una conexión inalámbrica individual lo cual aumenta la cantidad total de conexiones del WAP y aumenta la cantidad de dispositivos en los cuales se debe dividir el canal inalámbrico, el ancho de banda y la velocidad de transmisión.

Ahora, sea la anterior situación pero con el escalamiento de la red propuesto en el proyecto, sumando que el Tomacorriente Inteligente desarrollado es doble por lo que no se tendrían 50 TI individuales sino 25 TI dobles para cubrir la totalidad de los equipos de computo. Esto también implica que ya no existirían 50 conexiones inalámbricas individuales sino 25.

Adicional, un solo AP/Gateway de Perímetro pueda gestionar hasta cinco (5) Tomacorrientes Inteligentes. Por lo tanto, se requerirían únicamente 5 AP/Gateway de Perímetro para gestionar los 25 TI. Como lo dice su nombre, el AP/Gateway de Perímetro cumple la función



de WAP para los TI, pero también actúa en simultáneo como una puerta de enlace (*Gateway*) para conectarse a la red de comunicaciones. Así, en vez de tener las 50 conexiones inalámbricas individuales y permanentes de los TI al WAP, como ocurría anteriormente, se tendrían únicamente las 5 conexiones de los AP/Gateway de Perímetro, es decir, una reducción del 90 % de las conexiones inalámbricas (en el ejemplo).

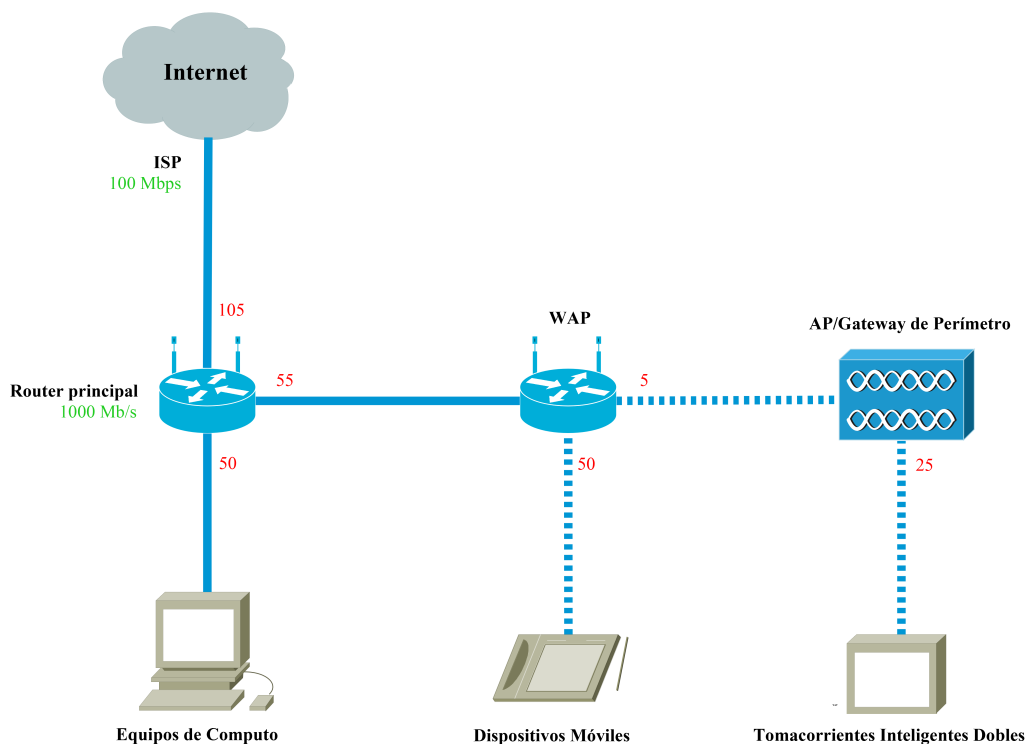
Otra ventaja de la implementación del AP/Gateway de Perímetro es la posibilidad de que la conexión inalámbrica entre los Tomacorrientes Inteligentes y el AP/Gateway de Perímetro se maneje, aunque sea con el mismo protocolo de comunicación WiFi, por un canal inalámbrico diferente del canal del WAP, dejando ese canal disponible exclusivamente para las conexiones de otros dispositivos, como los *SmartPhones*, y evitando así la saturación e interferencias tanto en las comunicaciones de los TI como en las de los otros dispositivos conectados al WAP.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Existen diferentes frecuencias para las comunicaciones inalámbricas. Ejemplo, la frecuencia 2.4 GHz que se usa en el protocolo WiFi. Sin embargo, cada frecuencia se puede dividir en varios canales, los cuales se componen de un rango de frecuencias específicas, para distribuirla y habilitar diferentes comunicaciones sin interferencias pero bajo aproximadamente la misma frecuencia y protocolo de comunicación.

**Figura 96**

*Escalamiento propuesto para la Red de Comunicaciones IoT*



**Nota:** Incluir el AP/Gateway de Perímetro, el cual gestionaría hasta 5 Tomacorrientes Inteligentes, reduce la cantidad total de conexiones inalámbricas al WAP

Por último, como valor agregado al escalamiento de la red propuesto, los Tomacorrientes Inteligentes no serán accesibles directamente a través de la red debido a que se configurará una red privada entre los TI y el AP del AP/Gateway de Perímetro. Esto aumenta la seguridad informática del sistema de telegestión IoT. En la primera situación presentada, 50 conexiones inalámbricas individuales conectadas directamente a la red (a través del WAP) significa 50 puntos vulnerables lo cual no es eficiente para la seguridad informática de la red de comunicaciones. Entre tanto, para la segunda situación, aunque existan las 25 conexiones inalámbricas de los TI, estos no están conectados directamente a la red, debido a que la red privada TI-AP es independiente de la red de comunicaciones general, lo que reduce el riesgo de una vulneración cibernética.

## Anexo 4. Descripción de los Requerimientos Técnicos

**Tabla 20**

*Requerimientos del Tomacorriente Inteligente*

<b>Componente</b>	<b>Requerimientos</b>
1. Clavija	Cumplir con la normatividad técnica nacional y los valores establecidos de tensión (120 a 240 V) y corriente (15/20 A) con la debida protección ambiental y de aislamiento eléctrico
2. Tomacorriente	Tomacorriente doble. Cumplir con la normatividad técnica nacional y los valores establecidos de tensión (120 a 240 V) y corriente (15/20 A) con la debida protección ambiental y de aislamiento eléctrico
3. Medidor eléctrico	Medición de tensión de hasta 240 V y corriente de hasta 20 A. Contar con protocolos de comunicaciones estándares (UART, TTL, I2C, RS, etc.) Compatibilidad con controladores electrónicos de 3.3 o 5 V
4. Actuador de Conmutación	Soportar conmutaciones de tensión desde 120 hasta 240 V y corrientes de hasta 15/20 A. Actuación sobre diferentes tipos de cargas eléctricas. Control digital (HIGH/LOW) compatible con niveles de 3.3 o 5 V
5. Actuador de Visualización	Capacidad de visualización multicolor para mostrar diferentes estados cualitativos. Control digital (HIGH/LOW o PWM) compatible con niveles de 3.3 o 5 V
6. Componentes de Protección	Componentes de protección contra corto circuitos, sobretensión, baja tensión, sobrecorriente, sobrecarga, consumo excesivo, consumo fantasma y sobretemperatura.
7. Controlador Comunicador	Nivel de trabajo a 3.3 y/o 5 V. Integración SoC de ADC, PWM, puertos GPIO, interfaces de comunicaciones, modulo inalámbrico WiFi. Arquitectura de 32 bits. Capacidad alta de memoria FLASH (mayor o igual a 1 MB) y RAM (Mayor o igual a 8 kB). Velocidad alta de operación (mayor o igual a 24 MHz).
8. Conversor AC/DC	Convertir los 120 a 240 V en 3.3 y/o 5 V. Suplir la potencia requerida por todos los componentes electrónicos.
9. Cableado y Conexiones	Cableado estándar AWG para hasta 240 V 15/20 A, cableado para señales de sensado y de control electrónico, PCB para montaje y conexiones eléctricas de los componentes electrónicos.
10. Componentes Misceláneos	Interruptor de encendido para 120 a 240 V 15/20 A, cumplimiento de las normas técnicas para la PCB, estructura (caja) no metálica con adecuado aislamiento eléctrico, tornillería según se requiera para el montaje de los componentes, y demás componentes y herramientas requeridos para el montaje del Tomacorriente Inteligente.

**Tabla 21***Requerimientos del AP/Gateway de Perímetro*

<b>Componente</b>	<b>Requerimiento</b>
1. Controlador Comunicador	Nivel de trabajo a 3.3 y/o 5 V. Integración SoC de puertos GPIO, interfaces de comunicaciones, modulo inalámbrico WiFi. Arquitectura de 32 bits. Capacidad alta de memoria FLASH (mayor o igual a 1 MB) y RAM (Mayor o igual a 8 kB). Velocidad alta de operación (mayor o igual a 24 MHz).
2. Registrador de Datos	Modulo de almacenamiento no volátil compatible con el controlador electrónico y con capacidad de mínimo 1 GB.
3. Regulador de Temperatura	Mantener la temperatura del controlador electrónico por debajo de 50 °C. Alimentación a 3.3 o 5 V
4. Fuente DC	Suministrar 3.3 o 5 V y la potencia requerida para los componentes electrónicos.
5. Cableado	Conexiones eléctricas para la alimentación de los componentes electrónicos, cableado para señales de control electrónico y comunicación entre los módulos.
6. Componentes Misceláneos	Estructura (caja) no metálica con adecuado aislamiento eléctrico, tornillería según se requiera para el montaje de los componentes, y demás componentes y herramientas requeridos para el montaje del AP/Gateway de Perímetro

**Tabla 22***Requerimientos de la Estación de Trabajo*

<b>Componente</b>	<b>Requerimiento</b>
1. Equipo de Computo	Contar con programas de IDE para programación de los controladores electrónicos, depuración serial (USB), gestión de los protocolos de comunicaciones para el acceso a Internet, y navegación web para el acceso a los servicios de Nube y la plataforma IoT.
2. Enrutador de Red	Contar con gestión LAN, WLAN y WAN. Requerido ancho de banda mínimo Fast Ethernet (100 Mb/s) y velocidad de transmisión mínima de 10 Mbps.
3. Fuente DC	Convertidores AC/DC adecuados para alimentar al Equipo de computo y al Enrutador de red.
4. Cableado	Cableado adecuado para las conexiones eléctricas y de red para el equipo de Computo y el Enrutador de red.

**Tabla 23***Requerimientos del Dispositivo Móvil*

<b>Componente</b>	<b>Requerimiento</b>
1. Dispositivo Móvil	Contar con modulo WiFi para acceso a Internet. SO compatible con navegador web para el acceso a los servicios de Nube y con la aplicación móvil para la interacción HMI.
2. Aplicación Móvil	Aplicación IoT para el diseño y desarrollo de la GUI de visualización móvil. Permitir la visualización cuantitativa y cualitativa de la información y la generación de las instrucciones de control. Compatible con WiFi. Enlazable con el controlador electrónico del AP/Gateway de Perímetro.
3. Fuente DC / Cargador	Convertor AC/DC o fuente DC adecuada para cargar el dispositivo móvil.

**Tabla 24***Requerimientos de Internet y los Servicios de Nube*

<b>Componente</b>	<b>Requerimiento</b>
1. Prestador de Servicios de Internet	Habilitar el acceso físico y cibernético a Internet y a sus protocolos, procesos, servicios y aplicaciones. Velocidad de transmisión mínima de 10 Mbps
2. Servicio de Plataforma de Nube IoT	Plataforma IoT para el diseño y desarrollo de la GUI de visualización remota y los Archivos de información. Permitir la centralización y gestión automatizada de la información del sistema de telegestión IoT. Enlazable con el controlador electrónico del AP/Gateway de Perímetro. Accesible desde cualquier dispositivo y ubicación geográfica a través de Internet.
3. Almacenamiento de archivos en Nube	Almacenamiento de los archivos de registro, procesamiento y análisis de la información del sistema de telegestión IoT. Accesible desde cualquier dispositivo y ubicación geográfica a través de Internet.

## Anexo 5. Listado de Componentes

**Tabla 25**

*Listado de componentes del prototipo*

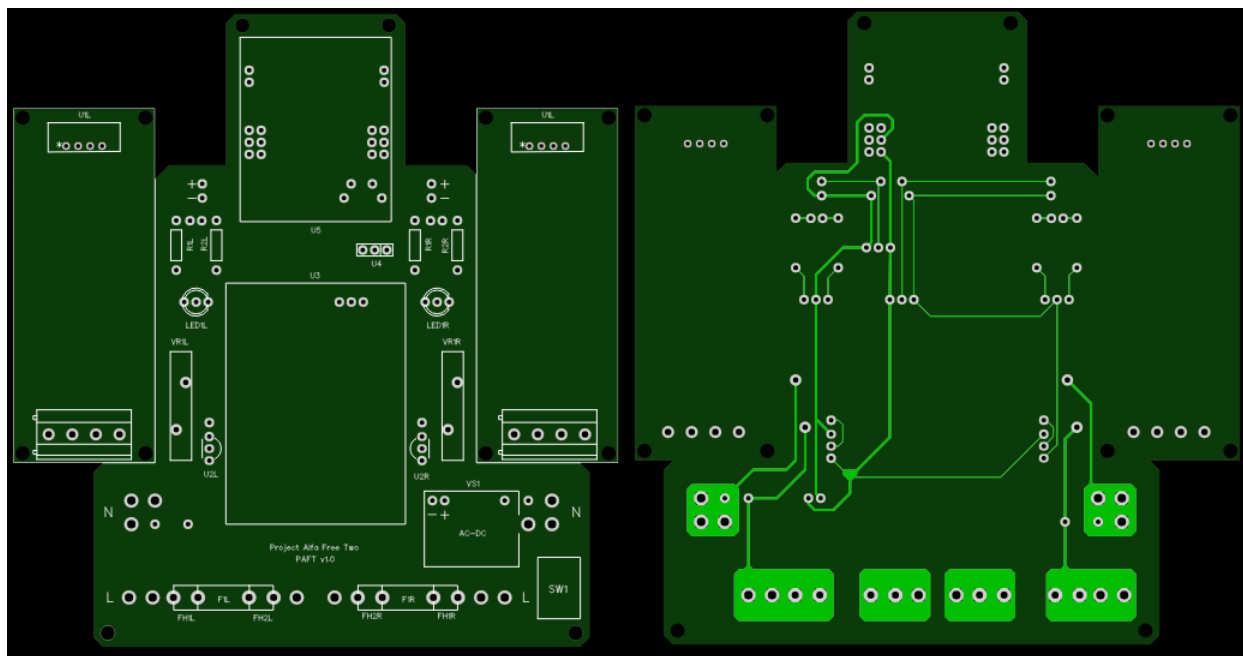
<b>Componente</b>	<b>Modelo</b>	<b>Cant.</b>
Clavija	NEMA 5-15	2
Tomacorriente	Doble NEMA 5-15 con puertos USB	1
Soporte Tomacorriente	Caja sencilla plastica para tomacorriente 10.3x6x4.5 cm	1
Medidor eléctrico	PZEM-004T-100A	2
Actuador de Conmutación	Modulo optocoplado 2 canales con reles JQC-3FF-S-Z	1
Actuador de Visualización	LED Bicolor RG con portaleds 5 mm	2
Portafusible	Portafusible para PCB	4
Fusible	Fusible corto de vidrio 5x20 mm 250 V 15 A	2
Varistor	MOV 20D241K	2
Sensor de Temperatura	LM35	2
Controlador electrónico (Tomacorriente Inteligente)	WeMos Mini D1 ESP32	1
Controlador electrónico (AP/Gateway de Perímetro)	Tarjeta de desarrollo ESP32-WROOM-32	1
Registrador de Datos	Holder para microSD	1
MicroSD	microSD 16 Gb	1
Regulador de Temperatura	Ventilador 5 V 30x30 mm	1
Equipo de Computo	Con IDE Arduino, Puertos USB, Google Chrome y Google Drive para Escritorios	1
Enrutador de Red	Modem ZTE ZXHN F660E	1
Dispositivo Móvil	Smartphone Android	1
Aplicación Móvil	Blynk IoT APP	1
ISP	ETB Plan 50 Mbps	1
Servicio de Nube IoT - Dashboard	Blynk IoT Cloud	1
Servicio de Nube IoT - Gestión de la Información	Google Sheets	1
Servicio de Nube IoT - Automatización de Procesos	Google Apps Scripts	1
Servicio de Nube IoT - Webhook	IFTTT Applet	1
Graficación de Estadísticas	Phyton Matplotlib	1
Almacenamiento de archivos en Nube	Google Drive	1

<b>Componente</b>	<b>Modelo</b>	<b>Cant.</b>
Convertor AC/DC	Convertor AC/DC 120 V a 5 V 0.6 A	1
Regulador de Tensión	Módulo AMS1117-3.3V	1
Fuente DC	Cable para conectar el AP/Gateway de Perímetro a un puerto o cargador USB 5 V	1
Fuente de Potencia	La respectiva del equipo de computo	1
Adaptador AC/DC	Adaptador AC/DC 12 V 1.5 A para módem	1
Cargador	Cargador de pared 5 V 2 A o por puerto USB para dispositivo móvil	1
Cableado eléctrico (Tomacorriente Inteligente)	1 m de AWG14x3	2
Cableado eléctrico	Cableado respectivo del computador y el módem	3
Cableado electrónico	XH-2.54-4P (PZEM)	2
Cableado electrónico	XH-2.54-2P	5
Cableado electrónico	Dupont H-H 10 cm	6
Cableado de red	Cable de red CAT 5E (Computador - Modem)	1
Cableado de red	Cable de red Fibra Óptica (Modem - ISP)	1
Interruptor	SPST para 250 V 20 A	1
PCB	Servicio de impresión PCB	1
Baquelita	Baquelita con Header M-4P y H-2P	1
Caja plástica (Tomacorriente Inteligente)	Caja plástica 21.1x14.5x9.6 cm	1
Caja plástica (AP/Gateway de Perímetro))	Caja plástica 8.4x5.7x3.6 cm	1
Tornillería	Tornillos M3	12
Tornillería	Tuercas M3	4
Tornillería	Tuercas M2	4

## Anexo 6. Diseños PCB

**Figura 97**

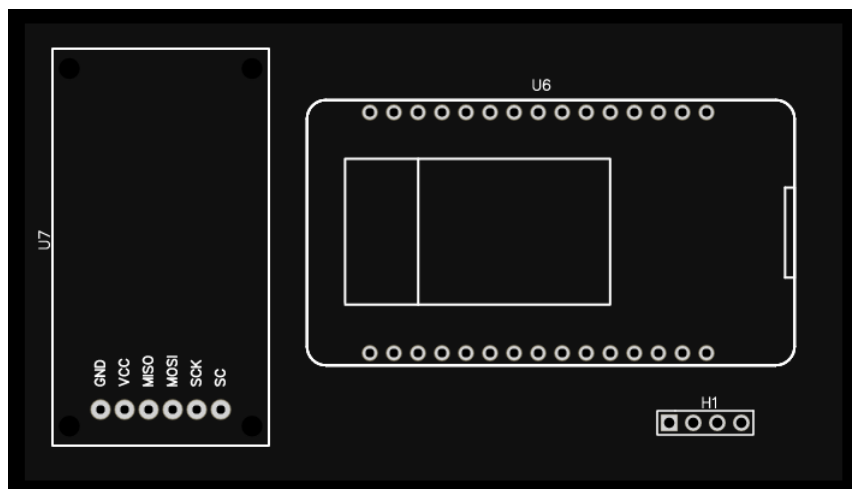
*Impresión 2D de la tarjeta electrónica del Tomacorriente Inteligente (PCB + medidores PZEM-004T)*



**Nota:** Izq.) la parte superior con la ubicación de los componentes. Der.) la parte inferior con las pistas.

**Figura 98**

*Impresión 2D de la tarjeta electrónica del AP/Gateway de Perímetro.*





Anexo 7. Archivos de Información

Figura 99  
 Archivo de Registro de los CSM

A	B	C
December 1, 2021 at 01:33PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119099E59F5799G315H139061J0000000K1L119200M27N10000295P12548Q.1R0S20211201123300T
December 1, 2021 at 01:34PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119000E59F5799G315H163851J0000000K1L119033M27N10330295P13404Q.1R0S20211201123400T
December 1, 2021 at 01:35PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119299E59F5799G315H152071J0000000K1L119299M27N10000295P13262Q.1R0S20211201123500T
December 1, 2021 at 01:36PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119283E60F5799G315H166811J0000000K1L119299M27N10000295P12719Q.1R0S20211201123600T
December 1, 2021 at 01:37PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119099E59F5799G315H169231J0000000K1L119128M27N10000295P13480Q.1R0S20211201123700T
December 1, 2021 at 01:38PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119200E59F5799G315H174641J0000000K1L119200M27N10000295P13538Q.1R0S20211201123800T
December 1, 2021 at 01:39PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119400E60F5900G315H158861J0000000K1L119400M27N10000295P13711Q.1R0S20211201123900T
December 1, 2021 at 01:40PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119271E59F5799G316H169001J0000000K1L119299M27N10000295P12675Q.1R0S20211201124000T
December 1, 2021 at 01:41PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119028E59F5771G316H163581J0000000K1L119099M27N10000295P14033Q.1R0S20211201124100T
December 1, 2021 at 01:42PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119200E59F5799G316H168301J0000000K1L119242M27N10000295P12295Q.1R0S20211201124200T
December 1, 2021 at 01:44PM	PAF2	_2A0B0000000CDD118700E59F5700G316H161281J0000000K1L118771M27N10000295P13135Q.1R0S20211201124400T
December 1, 2021 at 01:45PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119099E59F5742G316H174181J0000000K1L119099M27N10000295P13446Q.1R0S20211201124500T
December 1, 2021 at 01:46PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119099E59F5700G316H168301J0000000K1L119099M27N10000295P13791Q.1R0S20211201124600T
December 1, 2021 at 01:47PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119000E59F5799G316H174411J0000000K1L119099M27N10000295P14332Q.1R0S20211201124700T
December 1, 2021 at 01:48PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119000E59F5799G316H169801J0000000K1L119000M27N10000295P13031Q.1R0S20211201124800T
December 1, 2021 at 01:49PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119099E59F5725G316H177181J0000000K1L119099M27N10000295P13155Q.1R0S20211201124900T
December 1, 2021 at 01:50PM	PAF2	_2A0B0000000CDD118900E59F5700G317H168881J0000000K1L118900M27N10000295P13872Q.1R0S20211201125000T
December 1, 2021 at 01:51PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119099E59F5799G317H173371J0000000K1L119128M28N1071O295P14482Q.1R0S20211201125100T
December 1, 2021 at 01:53PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119071E59F5771G317H192831J0000000K1L119099M27N10000295P14447Q.1R0S20211201125200T
December 1, 2021 at 01:53PM	PAF2	_2A0B0000000CDD118985E59F5799G317H174531J0000000K1L119000M27N10000295P12559Q.1R0S20211201125300T
December 1, 2021 at 01:54PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119914E59F5714G317H177861J0000000K1L119000M27N10000295P13077Q.1R0S20211201125400T
December 1, 2021 at 01:55PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119149E59F5799G317H153211J0000000K1L119149M27N10000295P12994Q.1R0S20211201125500T
December 1, 2021 at 01:56PM	PAF2	_2A0B0000000CDD118900E58F5700G317H170151J0000000K1L118900M27N10000295P13653Q.1R0S20211201125600T
December 1, 2021 at 01:57PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119000E59F5700G317H157371J0000000K1L119099M27N10000295P13469Q.1R0S20211201125700T
December 1, 2021 at 01:58PM	PAF2	_2A0B0000000CDD119000E59F5700G317H179411J0000000K1L119000M27N10000295P12893Q.1R0S20211201125800T

**Nota:** Archivo de Registro de los Mensaje Seriales Codificados (CSM) provenientes del AP/Gateway de Perímetro

**Figura 100**  
*Archivo de Procesamiento de la información*

Sección Izquierda										Sección Derecha												
TID	No.	Fecha	Día	Hora	Estado	Código	Interruptor	Relé	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Consumo [Wh]	Temperatura [°C]	Estado	Código	Interruptor	Relé	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Consumo [Wh]	Temperatura [°C]
1	Acum1	20/11/2011	12:30:00	12:30:00	0	0000000	OFF	OFF	122.1	0.07	1.0	1784	11.04	1	0000000	OFF	OFF	122.0	0.07	1.0	1347	9.81
2	1	20/11/2011	12:31:00	12:31:00	0	0000000	ON	ON	119.1	0.69	5.8	315	13.996	1	0000000	OFF	OFF	119.2	0.67	1.0	293	12.448
3	2	20/11/2011	12:32:00	12:32:00	0	0000000	ON	ON	119.2	0.69	5.8	315	14.885	1	0000000	OFF	OFF	119.0	0.67	1.0	293	13.464
4	3	20/11/2011	12:33:00	12:33:00	0	0000000	ON	ON	119.3	0.69	5.8	315	15.207	1	0000000	OFF	OFF	119.3	0.67	1.0	293	13.252
5	4	20/11/2011	12:34:00	12:34:00	0	0000000	ON	ON	119.2	0.69	5.8	315	14.651	1	0000000	OFF	OFF	119.2	0.67	1.0	293	12.719
6	5	20/11/2011	12:35:00	12:35:00	0	0000000	ON	ON	119.1	0.69	5.8	315	14.913	1	0000000	OFF	OFF	119.1	0.67	1.0	293	13.448
7	6	20/11/2011	12:36:00	12:36:00	0	0000000	ON	ON	119.2	0.69	5.8	315	14.484	1	0000000	OFF	OFF	119.2	0.67	1.0	293	13.328
8	7	20/11/2011	12:37:00	12:37:00	0	0000000	ON	ON	119.4	0.69	5.9	315	13.886	1	0000000	OFF	OFF	119.4	0.67	1.0	293	13.711
9	8	20/11/2011	12:38:00	12:38:00	0	0000000	ON	ON	119.3	0.69	5.8	316	14.318	1	0000000	OFF	OFF	119.1	0.67	1.0	293	12.873
10	9	20/11/2011	12:39:00	12:39:00	0	0000000	ON	ON	119.2	0.69	5.8	316	14.831	1	0000000	OFF	OFF	119.2	0.67	1.0	293	12.728
11	10	20/11/2011	12:40:00	12:40:00	0	0000000	ON	ON	119.0	0.69	5.7	316	14.128	1	0000000	OFF	OFF	119.0	0.67	1.0	293	13.151
12	11	20/11/2011	12:41:00	12:41:00	0	0000000	ON	ON	119.1	0.69	5.7	316	14.418	1	0000000	OFF	OFF	119.1	0.67	1.0	293	13.448
13	12	20/11/2011	12:42:00	12:42:00	0	0000000	ON	ON	119.2	0.69	5.7	316	14.718	1	0000000	OFF	OFF	119.1	0.67	1.0	293	13.252
14	13	20/11/2011	12:43:00	12:43:00	0	0000000	ON	ON	119.1	0.69	5.7	316	14.418	1	0000000	OFF	OFF	119.1	0.67	1.0	293	13.448
15	14	20/11/2011	12:44:00	12:44:00	0	0000000	ON	ON	119.2	0.69	5.8	316	14.858	1	0000000	OFF	OFF	119.2	0.67	1.0	293	13.719
16	15	20/11/2011	12:45:00	12:45:00	0	0000000	ON	ON	119.0	0.69	5.8	316	14.58	1	0000000	OFF	OFF	119.0	0.67	1.0	293	13.811
17	16	20/11/2011	12:46:00	12:46:00	0	0000000	ON	ON	119.1	0.69	5.7	316	14.718	1	0000000	OFF	OFF	119.1	0.67	1.0	293	14.151
18	17	20/11/2011	12:47:00	12:47:00	0	0000000	ON	ON	119.2	0.69	5.7	317	14.885	1	0000000	OFF	OFF	119.2	0.67	1.0	293	14.832
19	18	20/11/2011	12:48:00	12:48:00	0	0000000	ON	ON	119.1	0.69	5.6	317	14.337	1	0000000	OFF	OFF	119.1	0.67	1.0	293	14.447
20	19	20/11/2011	12:49:00	12:49:00	0	0000000	ON	ON	119.0	0.69	5.6	317	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.1	0.67	1.0	293	14.447
21	20	20/11/2011	12:50:00	12:50:00	0	0000000	ON	ON	119.0	0.69	5.6	317	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.0	0.67	1.0	293	14.447
22	21	20/11/2011	12:51:00	12:51:00	0	0000000	ON	ON	119.1	0.69	5.6	317	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.1	0.67	1.0	293	14.447
23	22	20/11/2011	12:52:00	12:52:00	0	0000000	ON	ON	119.0	0.69	5.6	317	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.0	0.67	1.0	293	14.447
24	23	20/11/2011	12:53:00	12:53:00	0	0000000	ON	ON	119.1	0.69	5.6	317	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.1	0.67	1.0	293	14.447
25	24	20/11/2011	12:54:00	12:54:00	0	0000000	ON	ON	119.0	0.69	5.6	317	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.0	0.67	1.0	293	14.447
26	25	20/11/2011	12:55:00	12:55:00	0	0000000	ON	ON	119.1	0.69	5.6	317	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.1	0.67	1.0	293	14.447
27	26	20/11/2011	12:56:00	12:56:00	0	0000000	ON	ON	119.0	0.69	5.6	317	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.0	0.67	1.0	293	14.447
28	27	20/11/2011	12:57:00	12:57:00	0	0000000	ON	ON	119.0	0.69	5.6	317	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.0	0.67	1.0	293	14.447
29	28	20/11/2011	12:58:00	12:58:00	0	0000000	ON	ON	119.1	0.69	5.6	317	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.1	0.67	1.0	293	14.447
30	29	20/11/2011	12:59:00	12:59:00	0	0000000	ON	ON	119.0	0.69	5.6	317	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.0	0.67	1.0	293	14.447
31	30	20/11/2011	13:00:00	13:00:00	0	0000000	ON	ON	119.1	0.69	5.6	317	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.1	0.67	1.0	293	14.447
32	31	20/11/2011	13:01:00	13:01:00	0	0000000	ON	ON	119.0	0.69	5.6	318	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.0	0.67	1.0	293	14.447
33	32	20/11/2011	13:02:00	13:02:00	0	0000000	ON	ON	119.1	0.69	5.6	318	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.1	0.67	1.0	293	14.447
34	33	20/11/2011	13:03:00	13:03:00	0	0000000	ON	ON	119.0	0.69	5.6	318	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.0	0.67	1.0	293	14.447
35	34	20/11/2011	13:04:00	13:04:00	0	0000000	ON	ON	119.1	0.69	5.6	318	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.1	0.67	1.0	293	14.447
36	35	20/11/2011	13:05:00	13:05:00	0	0000000	ON	ON	119.2	0.69	5.6	318	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.2	0.67	1.0	293	14.447
37	36	20/11/2011	13:06:00	13:06:00	0	0000000	ON	ON	119.1	0.69	5.6	318	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.1	0.67	1.0	293	14.447
38	37	20/11/2011	13:07:00	13:07:00	0	0000000	ON	ON	119.0	0.69	5.6	318	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.0	0.67	1.0	293	14.447
39	38	20/11/2011	13:08:00	13:08:00	0	0000000	ON	ON	119.1	0.69	5.6	318	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.1	0.67	1.0	293	14.447
40	39	20/11/2011	13:09:00	13:09:00	0	0000000	ON	ON	119.0	0.69	5.6	318	14.283	1	0000000	OFF	OFF	119.0	0.67	1.0	293	14.447

**Nota:** Se muestra los Datos básicos (No. de medición, fecha, día y hora de registro), los Estados (estado general, código de estados, estado del interruptor virtual de la GUI y estado del relé) y las Variables eléctricas (tensión, corriente, potencia, consumo y temperatura) de cada sección del Tomacorriente Inteligente.

Figura 101

Archivo de Análisis de la información

PAF2-Der (11/11/2021) - 1R

Archivo Editar Ver Insertar Formato Datos Herramientas Extensiones Ayuda Última modificación hace 2 días

75% \$ % .0 .00 123 Arial 10 B I A

B2 =CONTAR(Procesamiento:libro:U367)

Estadística	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Muestras	362	362	362
Valores	26	4	3
Promedio	119,470	0,145	17,113
Cant. Promedio	14	130	73
Mediana	119,4	0,145	17,1
Cant. Mediana	17	133	73
Moda	119,2	0,145	17,0
Cant. Moda	31	133	82
Mínimo	118,2	0,143	16,8
Q1	119,0	0,145	17,0
Q2	119,4	0,145	17,1
Q3	119,9	0,148	17,2
Máximo	120,7	0,148	17,5
Cant. Mínimo	1	2	8
Cant. Q1	22	133	82
Cant. Q2	17	133	73
Cant. Q3	21	99	73
Cant. Máximo	4	99	1
IOR	0,9	0,001	0,2
Distribución Min	19,89%	22,10%	15,47%
Distribución IOR	57,73%	77,90%	82,88%
Distribución Max	22,38%	0,00%	21,58%
IOR Inferior	117,650	0,144	16,700
IOR Superior	121,250	0,148	17,500
Rango	2,5	0,003	0,7
Desviación Estándar	0,561	7,133E-04	0,152
Varianza	0,315	5,088E-07	0,023
Coefficiente de Variación	0,47%	0,49%	0,89%
Error Estándar	0,029	3,745E-05	0,008
Resolución	0,1	0,001	0,1
Incertidumbre	0,570	0,001	0,132
Error Relativo Porcentual	0,49%	0,85%	1,06%
Centroide	119,35	0,00	0,00

+ y Finales Mediciones con Multímetro

Analisis Descriptivo Cuentas Analisis Comparativo Analisis Historico

**Nota:** En pantalla, los datos de la estadística descriptiva. En otras pestañas, los datos de las cuentas por valor de cada variable, la estadística comparativa entre los modelos matemáticos y los valore representativos del conjunto de mediciones, y la estadística histórica de la evolución temporal de las variables.

## Anexo 8. Modelo Matemático Ideal de la Carga de Prueba

**Tabla 26**

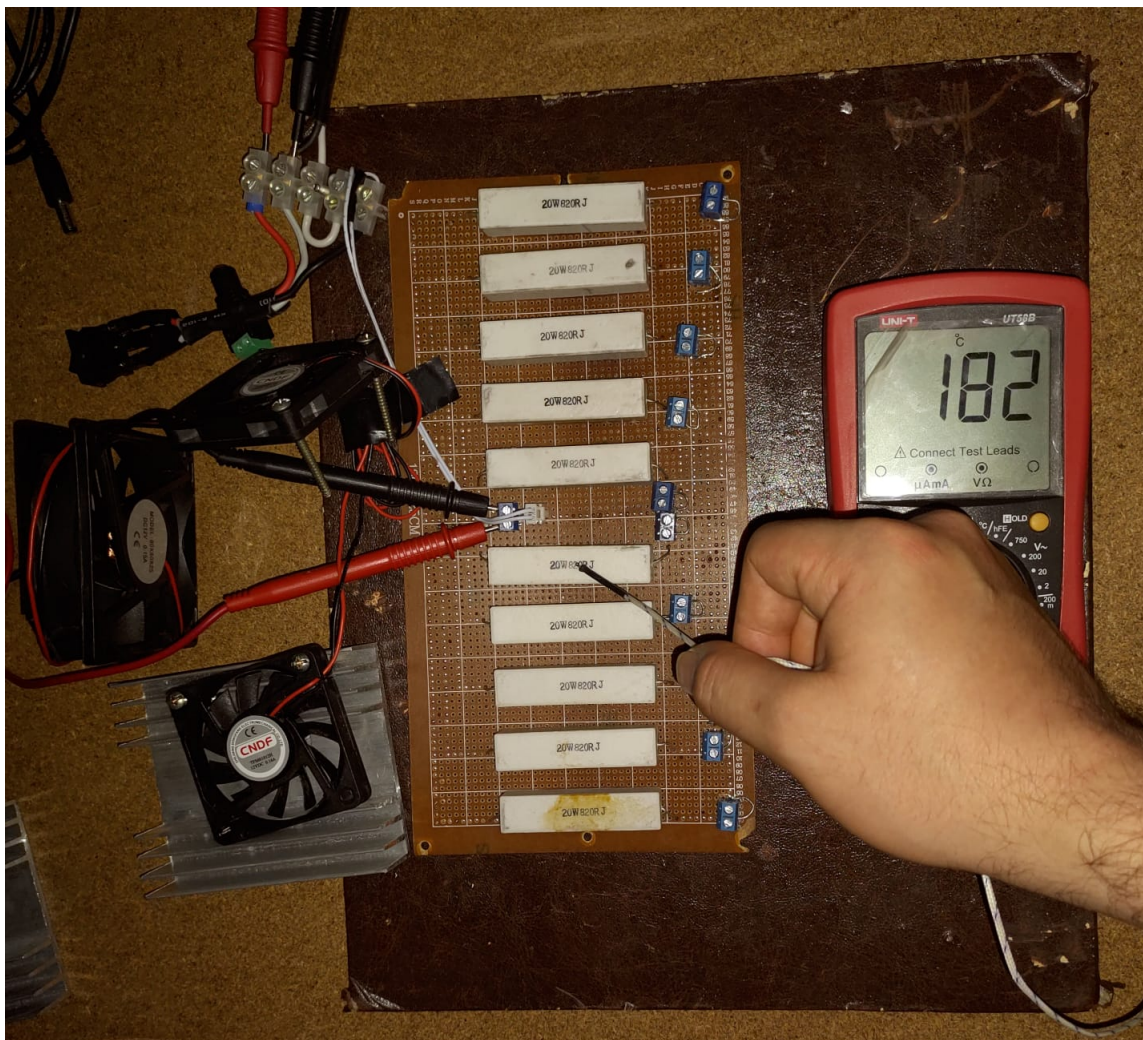
*Modelo Matemático Ideal de las variables eléctricas*

<b>Cant. Resistores</b>	<b>Resistencia Equivalente</b>	<b>Tensión Entrada</b>	<b>Corriente Total</b>	<b>Potencia Total</b>
$(n)$	$(R_T)$ [ $\Omega$ ]	$(V_T)$ [V]	$(I_T)$ [A]	$(P_T)$ [W]
1	820.000	120	0.146	17.561
2	410.000	120	0.293	35.122
3	273.333	120	0.439	52.683
4	205.000	120	0.585	70.244
5	164.000	120	0.732	87.805
6	136.667	120	0.878	105.366
7	117.143	120	1.024	122.927
8	102.500	120	1.171	140.488
9	91.111	120	1.317	158.049
10	82.000	120	1.463	175.610

## Anexo 9. Temperaturas de los Resistores de la Carga de Prueba

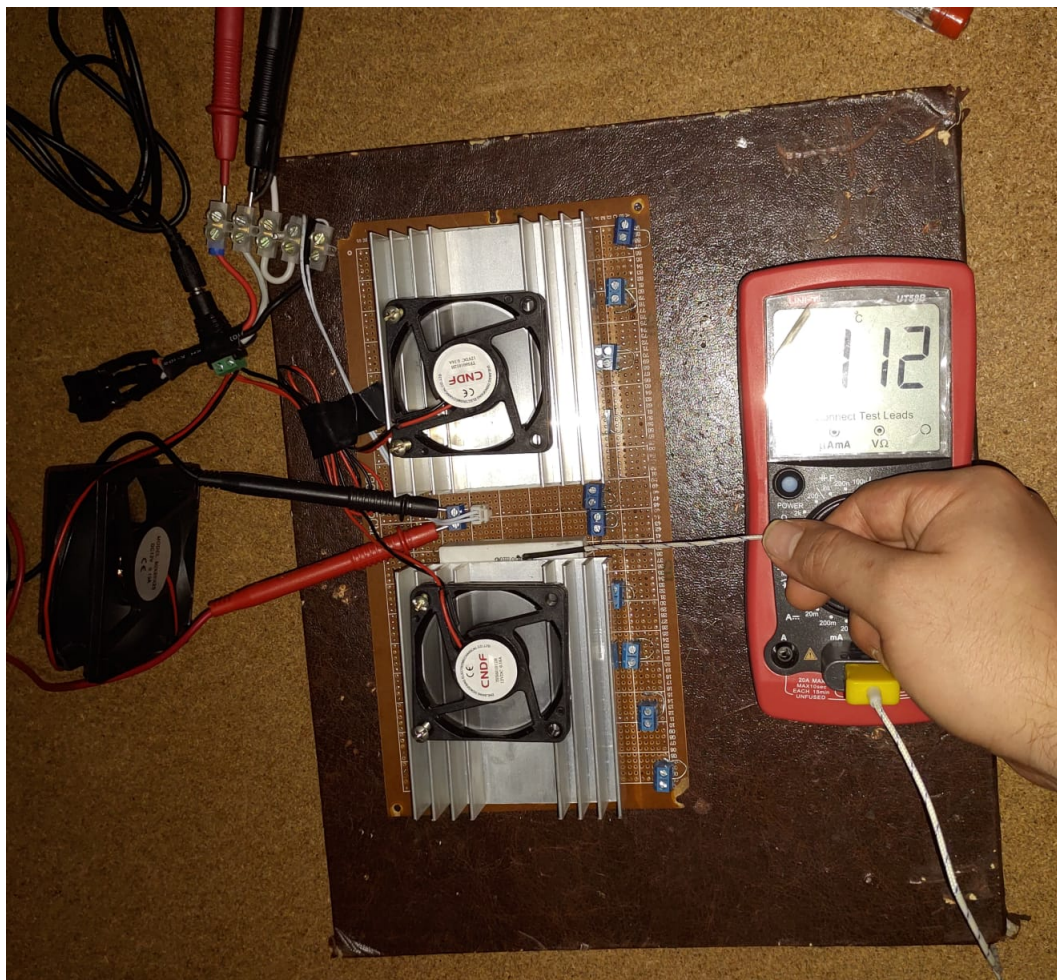
**Figura 102**

*Temperatura del Resistor sin el sistema de refrigeración*



**Figura 103**

*Temperatura del Resistor con el sistema de refrigeración triple: Disipador de aluminio, extractor de aire y ventilador. Se logra una reducción de la temperatura en hasta 70 °C*



## Anexo 10. Carga y Circuito de Prueba

**Figura 104**

*Carga de prueba con los resistores y las borneras KF301 que actúan como jumpers*

