



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO



César Daniel Vásquez Carrasco

Diseño, desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo remoto de parámetros eléctricos en redes de baja tensión

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Electrónico



Escuela de Ingeniería Eléctrica



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO

Diseño, desarrollo e implementación de un sistema de
monitoreo remoto de parámetros eléctricos en redes de
baja tensión

César Daniel Vásquez Carrasco

Informe para el título de Ingeniero Civil Electrónico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Héctor Vargas Oyarzún

Profesor Guía

Sr. Rodrigo Olgún Concha

Segundo Revisor

Sr. Paulino Alonso Rivas

Director de Escuela

Valparaíso, 12 de Septiembre de 2016

Resumen

El presente documento analiza la opción de la creación de un sistema de monitoreo específico para las redes de baja tensión, con la capacidad de realizar la toma de muestras de parámetros eléctricos desde la red eléctrica de forma remota y en tiempo real. Este estudio se dividió en las áreas que permitieron guiar el desarrollo de este sistema, las cuales fueron el estudio de la realidad actual de la red eléctrica en el país, la identificación de la problemática generada por la falta de fiscalización real del estado y el funcionamiento de la red eléctrica, la definición de los elementos que conforman el sistema de monitoreo remoto, la selección de componentes, y el desarrollo de los tres elementos que conforman el sistema diseñado, los cuales son los terminales remotos para la toma de muestras, el servidor para la administración de la información, y la interfaz visual para entregar el estado real de la red eléctrica en tiempo real. Para finalizar, se realizó un análisis de resultado del proyecto desarrollado, junto con un estudio económico sobre la viabilidad comercial en la implementación de este sistema. Cada uno de los elementos que conforman el sistema de monitoreo remoto fue desarrollado por separado, pero manteniendo el concepto de que la interacción de los mismos debe permitir el funcionamiento definido anteriormente. Esta diferenciación de los elementos que conforman el sistema permitió caracterizar al proyecto de forma modular, a modo de facilitar el desarrollo de cada componente de software por separado, junto con permitir la fácil escalabilidad del sistema en casos de que las capacidades intrínsecas de estos componentes requieran adaptarse a la carga de información que manejan.

Palabras claves: Baja tensión, tiempo real, parámetros eléctricos, sistema de monitoreo.

Abstract

This document analyzes the option of creating a specific monitoring system for low voltage networks, with the ability to perform sampling of electrical parameters from the electrical network remotely and in real time. The study was divided into the areas that allowed the development of this system, which were the current situation of the electricity network in the country, identifying the problems caused by the lack of control of the working condition, the definition of the elements of the remote monitoring system, component selection, and development of the three elements that make up the designed system, which are remote terminals for sampling, the server for information management, and the visual interface to deliver the real state of the electricity network in real time. To finish this document, an analysis of the project developed was made, along with an economic study on the commercial viability in the implementation of this system. Each of the elements of the remote monitoring system was developed separately, while maintaining the concept that the interaction of the elements must allow the operation method defined above. This differentiation of the elements of the system allowed to characterize it in a modular manner, so as to facilitate the development of each software component separately, along with allowing easy scalability of the system in cases where the intrinsic capabilities of these components require adapt to the load of information they handle.

Keywords: Low voltage, real-time, electrical parameters, monitoring system.

Índice general

Introducción.....	1
1 Presentación del proyecto	3
1.1 Situación actual de la red electrica.....	3
1.1.1 Decreto Supremo 327.....	4
1.1.2 Calidad de servicio eléctrico.....	5
1.2 Identificación de la problemática.....	7
1.3 Propuesta de sistema de monitoreo de redes de baja tensión.....	8
1.3.1 Red eléctrica inteligente (Smart Grid)	10
1.3.2 Análisis del estado del arte.....	11
1.3.3 Solución propuesta	13
1.3.4 Objetivos del proyecto	16
2 Diseño de la propuesta.....	17
2.1 Elementos del sistema	17
2.1.1 Terminal de toma de muestras	17
2.1.2 Administración de parámetros capturados	18
2.1.3 Interfaz Web.....	19
2.2 Características principales	20
2.2.1 Visualización en tiempo real	20
2.2.2 Comunicación	21
2.2.3 Flexibilidad del sistema	23
2.3 Selección de componentes	23
2.3.1 Análisis de Hardware	23
2.3.2 Análisis de Software	27
3 Construcción del terminal remoto	31
3.1 Implementación física.....	31
3.2 Desarrollo de software.....	35
3.2.1 Proceso de captura de variables externas	35
3.2.2 Proceso de generación de alarmas.....	37
3.2.3 Proceso de comunicación.....	40

3.2.4 Proceso de almacenamiento remoto de variables.....	42
3.3 Configuración final	43
4 Servidor de gestión de datos.....	44
4.1 Definición de los elementos internos	44
4.1.1 Terminal maestro	44
4.1.2 Sistema de alarmas.....	49
4.1.3 Base de datos	49
4.1.4 Servidor Web.....	51
4.2 Configuración final	54
5 Visualización del estado de la red eléctrica	55
5.1 Implementación del sistema	55
5.2 Configuración final	60
6 Pruebas de desempeño	61
6.1 Análisis de comunicación entre componentes	61
6.2 Pruebas de estabilidad.....	63
7 Evaluación económica	66
7.1 Análisis de costos	66
7.2 Escenario económico	68
7.3 Flujo de caja.....	70
7.4 Conclusiones finales del analisis	71
Discusión y conclusiones.....	72
Bibliografía	75
A Diseño de software	78
B Comunicación con la base de datos	83

Introducción

Los sistemas de monitoreo se han utilizado ampliamente en la sociedad desde los inicios de la era industrial, ya que permiten mantener un registro visual del comportamiento total y específico de cada proceso involucrado en un sistema variable en el tiempo. Esta herramienta de control ha ayudado a mejorar la productividad y la eficiencia de sistemas industriales, a partir de la identificación de los componentes que limitan el funcionamiento correcto del mismo, permitiendo el cambio o la reestructuración del sistema a partir de todos los elementos que lo componen. Inicialmente, este proceso se llevó a cabo por personas dedicadas a la toma de muestras en el lugar físico en donde se ubicaba el sistema industrial, pero gracias a los avances en la electrónica digital y la informática, se han desarrollado sistemas de monitoreo y control más complejos, que permiten mantener registros históricos del comportamiento de las variables del sistema monitoreado, junto con la capacidad del control a distancia, auto aprendizaje y el funcionamiento en locaciones remotas. Además de la capacidad de mejorar el funcionamiento de los sistemas industriales, los sistemas de monitoreo también son utilizados como una herramienta para demostrar el funcionamiento correcto de los procesos industriales frente a la fiscalización gubernamental, ya que la información que entregan hace posible la redacción de informes de desempeño. A partir de esto, los sistemas de monitoreo han sufrido una estandarización dentro de su funcionamiento interno, en torno a los elementos electrónicos que los componen, los tiempos entre toma de muestras y los protocolos utilizados para el manejo de información, con el fin de establecer la forma más fácil y eficiente de visualizar el proceso productivo, y a la vez agilizar los procesos de fiscalización.

Por otra parte, existen procesos industriales en donde es difícil realizar un monitoreo total de su funcionamiento, ya sea por la gran área geográfica en donde se desenvuelven, por la falta de investigación y desarrollo de estos sistemas para modernizar los procesos, o simplemente a causa de una débil fiscalización. Un caso específico de este problema es la generación y distribución de energía eléctrica, que presenta en su funcionamiento las mismas características que se formularon a fines del siglo XIX, y en donde solo se ha limitado el estudio académico a aumentar los niveles de eficiencia a través de las redes eléctricas, sin considerar el desarrollo de un sistema que incorpore el control automático dentro del funcionamiento de esta misma, a modo de distribuir de mejor forma la energía eléctrica a los consumidores.

En el último tiempo, y a consecuencia de los avances en la ingeniería electrónica y las telecomunicaciones, se definió el concepto teórico de Smart Grid, que contempla el diseño de una red de monitoreo y control complementaria a la red eléctrica, que permite visualizar el comportamiento en tiempo real de todos los elementos que conforman esta red, a modo de permitir el análisis de la información generada de forma global, y de esta forma, permitir la identificación de los métodos más eficientes para la transmisión de energía eléctrica en base a la fluctuación en el consumo de los clientes de la red. Este sistema es un gran avance para el funcionamiento de la distribución de electricidad, ya que le entrega a las empresas que intervienen en este proceso las herramientas para identificar y resolver problemas en la calidad del producto eléctrico, junto con presentarle a los entes reguladores la capacidad de fiscalización en tiempo real con respecto al funcionamiento de la red eléctrica. Por la naturaleza teórica de esta idea, todavía no se han identificado los métodos correctos para el desarrollo e implementación de este sistema de monitoreo, ni la naturaleza económica de los proyectos desarrollados bajo esta idea, y por este motivo, es difícil identificar el impacto que generará su implementación en las empresas del rubro eléctrico ni en los consumidores. Por este motivo, se hacen necesarios los estudios académicos que toquen en profundidad todos los elementos que intervienen en la ejecución de este proyecto de red eléctrica inteligente, en la medida de contribuir al diseño, desarrollo e implementación de este sistema en el futuro.

El proyecto presente en este documento entrega una alternativa viable para visualizar el comportamiento real de la red eléctrica de baja tensión, a partir del diseño de un sistema flexible y adaptable a los cambios que presente la misma, a modo de lograr la captura de variables eléctricas de forma remota en los puntos geográficos que estén contemplados en su implementación. Este sistema de monitoreo es una herramienta complementaria al funcionamiento de la red eléctrica, que entrega información del estado real de la red a las empresas del rubro que mantienen en funcionamiento la distribución de energía eléctrica, lo que permite el estudio de las variables eléctricas por parte de estas empresas para solucionar problemas y mejorar el proceso de distribución.

1 Presentación del proyecto

Con el fin de definir la propuesta de sistema de monitoreo remoto para las redes de baja tensión, es necesario analizar el funcionamiento del proceso de distribución eléctrica, además de los conceptos que definen la calidad del servicio entregado por las empresas que intervienen en esta red, y a partir de esto, se puede identificar la problemática generada por una mala metodología de fiscalización en el caso del funcionamiento de la red eléctrica. Este análisis entrega todas las herramientas necesarias para definir el proyecto en su totalidad, lo que permite conformar una propuesta que ataca la problemática presente en las redes de baja tensión.

1.1 Situación actual de la red eléctrica

La creación de las redes de distribución eléctrica en corriente alterna datan de fines del siglo XIX, que nacieron a partir de los avances en la investigación y desarrollo de maquinaria industrial impulsada por potencia eléctrica, y la necesidad en la implementación del alumbrado público en zonas urbanas a partir de la invención de la bombilla eléctrica. Estas redes de distribución eléctrica no necesitaban una gran capacidad de generación de potencia eléctrica, ya que los consumidores finales de la red estaban acotados a la distribución geográfica en donde se instalaba la red. En los inicios del siglo XX, las necesidades de potencia eléctrica industrial y de consumo doméstico aumentaron significativamente, lo que impulsó el desarrollo de nuevas centrales de generación y el aumento en la distancia de distribución, lo que permitió definir el concepto de red de distribución eléctrica que conocemos actualmente, y que trajo como consecuencia la tradición de aumentar en tamaño la red a partir del aumento de la demanda eléctrica.

La posibilidad del consumo eléctrico en sectores que estaban conectados a la red de distribución cambió significativamente la vida de las personas, pues permitió la instalación del alumbrado público y la creación del transporte eléctrico por parte de las instituciones públicas del estado, además de la creación del mercado de las herramientas que consumen energía eléctrica, que hasta el día de hoy ha presentado enorme aumento cada año, por la capacidad de entregar productos para el sector industrial y para el uso doméstico de igual manera. La adopción de la energía eléctrica desde sus inicios ha impulsado a las empresas que intervienen en la red de distribución a aumentar la potencia que entregan a la red, ya que desde las primeras redes eléctricas de fines del siglo XIX hasta la actualidad, se ha mantenido un aumento en las

necesidades de potencia eléctrica por parte de los consumidores de este servicio, a consecuencia de que los elementos eléctricos industriales y domésticos son utilizados con mayor frecuencia en la vida cotidiana, llegando al punto de ser considerados elementos de primera necesidad por parte de algunos sectores de la sociedad, por ser un pilar fundamental para la vida en el siglo XXI.

En la actualidad, la red de distribución eléctrica en Chile se encuentra dividida en cuatro sistemas independientes, que en su totalidad abarcan la mayor parte del territorio del país, estos son el Sistema Interconectado Central (SIC), el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), el Sistema Eléctrico de Aysén y el Sistema Eléctrico de Magallanes. Cada uno de estas redes independientes se distribuye en zonas geográficas específicas y satisfacen necesidades de consumo eléctrico específicos, como por ejemplo el SING, que entrega energía eléctrica a las regiones I y II, y el Sistema Eléctrico de Aysén en la XI región. Estas dos zonas geográficas tienen necesidades de consumo eléctrico completamente distintas una de la otra, aparte de estar ubicadas a una gran distancia dentro del territorio del país, por lo que la existencia de múltiples redes de distribución se justifica en estos casos. El hecho de la no existencia de una sola red unificada de distribución eléctrica en Chile produce beneficios, como la capacidad de suministrar energía a sectores específicos del país, y también permite que estas redes sean inmunes a problemas generados por las otras redes, lo que le asegura que un problema eléctrico en el norte de Chile no producirá un corte de servicio en las regiones australes del país.

Este sistema múltiple de distribución de energía eléctrica genera dificultades al momento de fiscalizar que su funcionamiento este dentro de la normativa chilena, ya que se debe garantizar que estas cuatro redes entreguen los mismos parámetros eléctricos a los consumidores, junto con controlar que las empresas privadas que actúan dentro de estas redes cumplan con la normativa legal vigente. Para cumplir este objetivo, se promulgó en el año 1997 por parte del presidente de la república el Decreto Supremo 327 [1], que fija las obligaciones de las empresas involucradas en las redes de distribución, junto con entregarle al ministerio de energía y a la superintendencia de electricidad y combustibles (SEC) las herramientas para la fiscalización y el cuidado de los consumidores finales de la energía eléctrica.

1.1.1 Decreto Supremo 327

Un decreto supremo es una herramienta legislativa, que le entrega al presidente de la república la capacidad de fijar un número de leyes específicas a un ente fiscalizador dependiente del gobierno. El decreto supremo 327 presenta el reglamento definido para estandarizar y fiscalizar la actividad de los servicios eléctricos por parte de la superintendencia de electricidad y combustibles. Este decreto supremo describe el funcionamiento de la red eléctrica en tres áreas: Generación, Transmisión y Distribución, y a consecuencia de esto, obliga a cada una de las empresas que se desarrollen dentro de estas áreas a cumplir con el reglamento descrito en los artículos de este decreto supremo, que contemplan desde los métodos de licitación del espacio público, los rangos de fluctuación de los parámetros eléctricos que caracterizan a cada área, hasta las multas en casos del no cumplimiento de la norma.

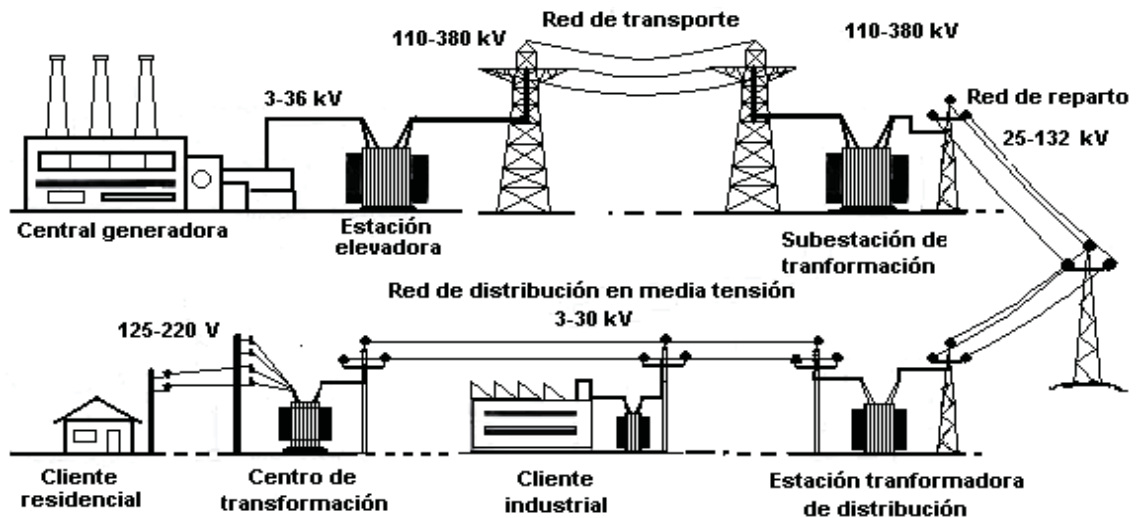


Figura 1-1 Diagrama de la red de distribución

Dentro de los elementos que conforman el decreto supremo 327, resalta la definición de “calidad de suministro eléctrico”, que permite fijar un estándar en los parámetros eléctricos que entregan los cuatro sistemas interconectados del país, junto con entregar las herramientas necesarias para llevar a cabo la fiscalización de la calidad del servicio eléctrico en cada uno de los elementos que conforman la red de distribución eléctrica. A partir de esto, se estableció un concepto de comportamiento normal y anormal de los parámetros eléctricos, en base a las indicaciones existentes dentro de la definición de la calidad de servicio.

1.1.2 Calidad de servicio eléctrico

El artículo 223 del decreto supremo 327 define el concepto de calidad del suministro eléctrico, a partir de la caracterización de la electricidad como un servicio que es producido por todas las empresas que intervienen en la red eléctrica, ya sean las empresas de generación eléctrica, de transmisión o de distribución. Con esto, se obliga a las empresas del rubro eléctrico a asegurar que los parámetros eléctricos de este servicio se mantengan dentro de los márgenes entregados por el documento legal, con el fin de asegurar la estandarización del servicio eléctrico a través de todo el territorio del país. Estos parámetros eléctricos son representados por rangos óptimos de funcionamiento, que varían dependiendo del sector de la red eléctrica en donde se capturen, para representar la importancia de la calidad de la red eléctrica tramos específicos de la red, como por ejemplo, en el área de la generación eléctrica, ya que la existencia de algún problema dentro de esta área pone en peligro la seguridad de toda la red y la calidad del producto final. Los parámetros eléctricos específicos que definen la calidad del servicio eléctrico son la frecuencia, la tensión de línea, la distorsión armónica de corriente, el contenido armónico de tensión y las componentes armónicas de tensión, además de las interrupciones en el servicio. La tabla 1-1 presenta un resumen de los rangos de variación de los parámetros eléctricos relevantes en el caso de la red de baja tensión.

Tabla 1-1 Rangos aceptables para redes de baja tensión

Parámetros Eléctricos	Rango aceptable
Frecuencia	49.8 a 50.2 Hz
Tensión nominal	203.5 a 236.5 Vrms
Distorsión armónica de corriente	Menor al 5%

En la tabla 1-1 se observa el estándar que afecta al servicio eléctrico en el país, donde se define una frecuencia promedio de 50 Hz y una tensión nominal promedio de 220 V. A partir de estos rangos de funcionamiento, el decreto supremo exige que el servicio eléctrico entregado por las empresas cumpla estos requisitos a lo menos el 94% del periodo en donde se tomaron las muestras para realizar el estudio. Para el caso del contenido armónico de tensión, la normativa legal divide el espectro en tres áreas, a partir de la naturaleza impar en la generación de estos elementos en la red.

Tabla 1-2 Armónicas de tensión impares múltiplos de tres

Orden	Amplitud normalizada (%)
3	5
9	1.5
15	0.3
21	0.2
>21	0.2

En el primer rango entregado por el decreto supremo 327 sobre el contenido armónico de tensión son las armónicas múltiplos de tres, se especifica explícitamente los rangos máximos de las amplitudes normalizadas del contenido armónico.

Tabla 1-3 Armónicas de tensión impares no múltiplos de tres

Orden	Amplitud normalizada (%)
5	6
7	5
11	3.5
13	3
17	2
19	1.5
23	1.5
25	1.5
>25	$0.2+1.3*25/n$

Para el segundo caso del contenido armónico de tensión de orden impar no múltiplo de tres, indicado en la tabla 1-3, cabe destacar la fórmula entregada para el cálculo de las armónicas de orden mayor a 25, donde se especifica que la amplitud nominal de estas debe ir disminuyendo.

Tabla 1-4 Armónicas de tensión pares

Orden	Amplitud normalizada (%)
2	2
4	1
6	0.5
8	0.5
10	0.5
12	0.2
>12	0.2

En el último caso entregado por el decreto supremo 327, indicado en la tabla 1-4, se especifican las amplitudes máximas del contenido armónico de tensión de orden par, que por la naturaleza de su generación dentro de las redes eléctricas, se entregan rangos máximos de menor amplitud con respecto a los demás casos expresados anteriormente. La normativa legal solo entrega restricciones para el contenido armónico de tensión, ya que la existencia de estos elementos en la red eléctrica produce cambios en la forma de onda de la tensión entregada a los usuarios, lo que puede llevar a problemas de funcionamiento de los elementos eléctricos que utilicen la tensión alterna que le entrega la red.

Otros elementos mencionados por el decreto supremo son los rangos de fluctuación de la distorsión armónica de corriente y las interrupciones del servicio eléctrico, pero no fueron incluidos dentro de este análisis a modo de simplificar la definición de calidad de servicio. Esta descripción de los rangos óptimos de funcionamiento de la red eléctrica son detallados para estandarizar la redacción de los informes de desempeño, realizados por las empresas del rubro eléctrico, y revisados en detalle por la superintendencia de electricidad y combustibles.

1.2 Identificación de la problemática

Al analizar el decreto supremo se identificó un problema grave al momento de fijar la metodología de medición y control de los parámetros presentados anteriormente, que se especifica en el artículo 227 del mismo y que es el punto central del desarrollo de este proyecto. Cabe destacar que el cumplimiento de estos artículos es obligatorio, y que cualquier medida impuesta por la empresa para ayudar a mejorar la calidad de la red eléctrica no está contemplada en el decreto supremo. El artículo 227 explicita la metodología de medición y fiscalización de estos parámetros, en donde se le entregan a las empresas que intervienen en la red de distribución dos alternativas para la generación de los informes de calidad. En primer lugar, las empresas pueden elegir un punto específico de su participación en la red para la toma de muestras, con el fin de generar un informe de calidad de servicio que caracteriza toda la distribución geográfica en donde participan, y en segundo lugar, existe la posibilidad que la superintendencia de electricidad y

combustibles elija los puntos de medición, para luego realizar una fiscalización más extensa en coordinación con la misma empresa.

Al analizar este artículo se puede observar las excesivas atribuciones que se les da a las empresas del rubro al momento de definir la calidad de la red eléctrica en donde están trabajando, ya que a partir del análisis de un solo punto de la red elegido unilateralmente por la empresa, este mismo no entrega una muestra representativa de la medición realizada, y al utilizar el segundo método presentado por el artículo 227, se necesita la coordinación de la superintendencia y la empresa, que solo sucede en situaciones excepcionales y que tampoco muestran el funcionamiento real de la red. La problemática de la falta de fiscalización real de las redes de distribución eléctrica, y en específico para el último tramo de esta red, produce para las empresas una invisibilidad de la red eléctrica en donde están trabajando, ya que los entes fiscalizadores no les obligan a mantener un sistema de monitoreo de su propia red, solo enfocándose a la generación de informes de calidad en puntos específicos en donde la empresa tiene conocimiento que sus mediciones seguirán estos rangos de funcionamiento establecidos. Esta falla en la metodología de fiscalización de la red de distribución se ve reflejada en el “Ranking de Calidad de Servicio de las Empresas de Distribución de Electricidad” [2], generado anualmente por la superintendencia de electricidad y combustibles, que en el año 2014 califica a las empresas distribuidoras con nota promedio 8.15 en una escala de 1 a 10, pero la percepción de la ciudadanía califica la confiabilidad de estas empresas con nota promedio de 5.5 en una escala de 1 a 7. Este contraste en la calificación por parte de los entes fiscalizadores, versus la percepción del cliente final de la energía eléctrica, es un fiel reflejo del problema identificado sobre la falta de monitoreo real de la red eléctrica, a partir la falla en los métodos encargados de fiscalizar su funcionamiento.

En el caso específico del monitoreo de la red eléctrica, el único método definido por el decreto supremo para controlar que el producto eléctrico que se está consumiendo tiene algún tipo de fallos, es la creación de plataformas de reclamos para los consumidores, lo que permite a las empresas distribuidoras identificar fallas en la red a costa del malestar de los consumidores. Por este motivo, si existe un problema en la red de baja tensión, la empresa encargada de entregar este servicio eléctrico solo puede identificarlo si existe algún reclamo formal bajo su plataforma. En el último tiempo se han documentado fallas en la red de baja tensión que han producido incendios en sectores residenciales, fallas en sistemas vitales para la salud de los consumidores y daños en la propiedad privada, los cuales no se pueden prevenir por parte de las empresas distribuidoras ya que no tienen visibilidad del estado real de la red.

Esta falta de visibilidad de la red de baja tensión será la problemática a resolver durante el desarrollo de este proyecto.

1.3 Propuesta de sistema de monitoreo de redes de baja tensión

A partir del análisis anterior, se pudo identificar el problema de la invisibilidad de la red por parte de las empresas del rubro de la distribución de energía eléctrica, a consecuencia de la falta de iniciativa propia por parte de estas empresas, junto con la nula exigencia legal para implementar este sistema. Este fenómeno también puede ser acreditado a la falta de investigación dentro de estas empresas, ya que los avances en la electrónica y las telecomunicaciones hacen

posible que en la actualidad se puedan desarrollar sistemas de monitoreo que anteriormente eran inviables. Por este motivo, las empresas encargadas de la distribución eléctrica han aprendido a operar sin la necesidad del monitoreo constante de su red, a costa de asumir los problemas que genera esta problemática, como lo son las conexiones ilegales a la red y los fallos provocados por la falta de información real sobre los elementos físicos que componen su red de baja tensión. La creación de un sistema de monitoreo remoto dedicado a entregarle a estas empresas la visibilidad que nunca han tenido de su propia red, tendría consecuencias beneficiosas en todas las áreas administrativas que definen su funcionamiento interno. Este sistema de monitoreo también traería consecuencias hacia los consumidores finales del producto eléctrico, ya que se eliminaría la necesidad del sistema de reclamos que define el decreto supremo 327, permitiéndole a los consumidores saber que la empresa que les entrega el servicio eléctrico tiene conocimiento real de los problemas que les afectan. Con esto, se agilizarían los procesos de reposición del suministro eléctrico, y mejoraría la percepción de los consumidores hacia las empresas encargadas de la distribución eléctrica.

Para el diseño de un sistema de monitoreo remoto, y en especial para el caso de las redes de baja tensión, se tuvo que tomar en cuenta la gran distribución geográfica que abarcan estas redes dentro del territorio del país, lo que genera el problema de la comunicación de los parámetros medidos que se deseen capturar del sistema. Otro factor a considerar para el diseño de esta propuesta, es la creación de un terminal de toma de muestras que no afecte la estabilidad ni el funcionamiento normal del punto en donde se implementará, ya que este factor pondría en riesgo la calidad de la información capturada de la red de baja tensión. Por estos motivos, la propuesta de sistema de monitoreo se basa en la utilización de la red de internet móvil, que ha tenido avances considerables en los últimos años, y que permite el envío de una gran cantidad de información a través de redes TCP, en donde se asegura que los problemas de conexión no afectarán la integridad del paquete de información recibido, además de la creación de terminales remotos no invasivos, para permitir que la medición capturada de la red de baja tensión sea independiente de la implementación del sistema, junto con permitir la fácil instalación de estos elementos de toma de muestras.

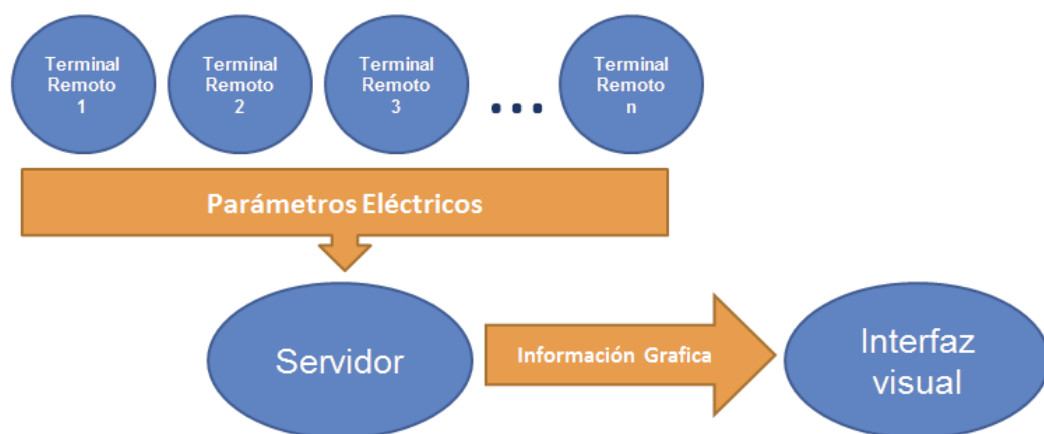


Figura 1-2 Propuesta de sistema de monitoreo remoto

En la figura 1-2 se observa la propuesta de sistema de monitoreo remoto a partir del análisis anterior, que consta de tres elementos principales para su funcionamiento, los cuales son los terminales remotos capaces de capturar los parámetros eléctricos de la red de baja tensión, un sistema en la nube para administrar la información capturada, y una interfaz visual que presente el funcionamiento de la red en tiempo real. Esta forma de diseño de los sistema de monitoreo fue basado en la teoría de los sistemas SCADA y en el concepto de Smart Grid, y será la base fundamental en el diseño y desarrollo de la propuesta para el monitoreo de las redes de baja tensión. El flujo de información a través del sistema comenzará con la captura de los parámetros eléctricos que caracterizan a la red de baja tensión, para luego conformar un paquete de información que será enviado hacia el servidor en la nube, que se encargará de traducir estos parámetros en información útil para el cliente del sistema, que podrá visualizar el contenido a partir de gráficos e información temporal a través de un navegador Web. Este sistema será un complemento a la red de distribución de baja tensión, que permitirá a las empresas que trabajan en esta red la capacidad de visualizar el estado real del funcionamiento, para luego tomar decisiones que ayuden a mejorar el desempeño en la entrega de energía eléctrica a los consumidores.

Esta propuesta fue diseñada a partir de la idea de una red de información, que complemente el funcionamiento de la red de distribución, y este concepto en particular ya ha sido objeto de investigación en el último tiempo bajo el nombre Smart Grid o Red Inteligente. Por este motivo, es necesario contrastar la propuesta diseñada con otros estudios teóricos hechos para resolver la problemática identificada, para así definir con mayor seguridad una propuesta viable para desarrollar el sistema de monitoreo remoto para caracterizar el funcionamiento real de la red de baja tensión.

1.3.1 Red eléctrica inteligente (Smart Grid)

A fines del siglo XX, y a partir de los avances en la tecnología de medición y control de variables eléctricas, se inició el estudio de nuevas alternativas para modernizar la forma en que es distribuida la energía eléctrica, lo que concluyó con la presentación de la idea de transformar la red eléctrica tradicional en una nueva red inteligente, capaz de capturar información del estado real de todos los elementos que la conforman, para permitir que estos mismos puedan adaptar su funcionamiento con respecto a la variabilidad natural que está presente en la red de distribución. Este nuevo concepto de una red de distribución inteligente permitiría la comunicación bidireccional entre los consumidores y las empresas que intervienen en la red, entregándole a las empresas una mayor cantidad de información para identificar problemas en la red, y así afectar positivamente la experiencia de los clientes de la red eléctrica, ya que la red se adaptaría a la variabilidad en el consumo de ellos. La base principal de la red inteligente es integrar el control automático en la red de distribución eléctrica, a partir de la generación de información bidireccional entre los consumidores y las empresas que intervienen en el proceso.

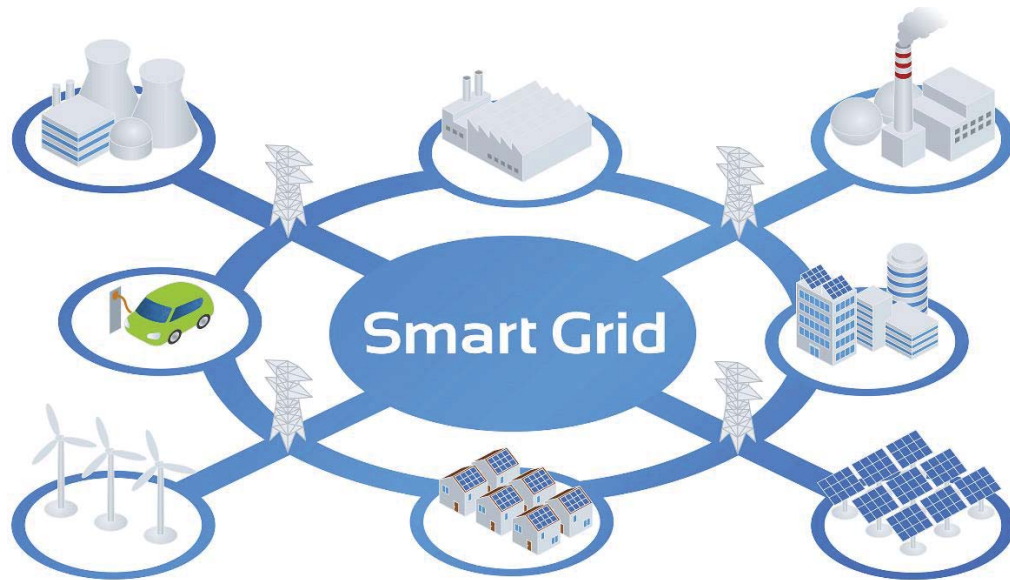


Figura 1-3 Smart Grid

La idea de la red eléctrica inteligente ha estado en constante cambio, principalmente por los peligros y el costo de inversión que genera la puesta en marcha final de este proyecto. La implementación de un sistema de control de la red eléctrica de tal magnitud traería consigo la posibilidad de ataques al funcionamiento de este, que pondrían en riesgo el suministro eléctrico a territorios completos, además de la no existencia de un mercado dedicado al desarrollo de los elementos para conformar la red inteligente, por lo que toda la investigación y diseño de estos componentes solo podría ser financiado con recursos de las mismas empresas, o en algunos casos, a partir de incentivos gubernamentales. A pesar de estos inconvenientes en la implementación del sistema, es natural resaltar los beneficios que traería la creación de la red inteligente en el ámbito de la distribución eléctrica mundial, ya que la idea de distribuir electricidad a partir del consumo que necesiten los clientes disminuiría la contaminación generada por el proceso de generación eléctrica, y permitiría la utilización más eficiente de la energía eléctrica en todos los elementos que conforman la red de distribución.

1.3.2 Análisis del estado del arte

Dentro de los elementos que conforman la idea del Smart Grid, el sistema que ha sido adoptado de mejor manera por parte de los sistemas de distribución a nivel mundial son los medidores inteligentes, que permiten actualizar el sistema de medición del consumo eléctrico del método mecánico a un sistema capaz de mantener un registro histórico de la variación en el consumo eléctrico domiciliario. La información generada por los medidores inteligentes le entrega a las empresas de distribución una herramienta eficaz para calcular el cobro por el consumo eléctrico, ya que las mediciones efectuadas son más exactas que la medición mecánica, y al mantener un registro histórico se puede identificar si ha existido una manipulación externa del medidor para modificar el consumo. La implementación de estos sistemas es el punto más sencillo dentro de la conformación de la red inteligente, ya que solo es necesario cambiar los medidores de consumo en un área geográfica específica.

medidores inteligentes por parte de Chilectra [7], que inició su proceso de actualización a fines del año 2015 y se espera que termine a fines del año 2016. Esta tendencia global de actualización en el método de facturación del consumo eléctrico es el primer paso para la implementación de redes inteligentes en el futuro, y se espera que este proceso termine de manera global en el año 2020. Lamentablemente, la instalación de medidores inteligentes puede llevar a un estancamiento en la investigación de otros elementos que conforman el concepto de Smart Grid, ya que su facilidad de instalación y la fiabilidad en su funcionamiento pueden generar un sentimiento falso de estabilidad de esta nueva red eléctrica.

1.3.3 Solución propuesta

A partir de los análisis presentados anteriormente, se identificó el problema de la falta de visibilidad de la red de baja tensión por parte de las empresas de distribución eléctrica, que ha estado presente desde la creación de la red eléctrica y que se ha mantenido en el tiempo, a causa de la débil fiscalización por parte de los entes gubernamentales, y por la dificultad para diseñar sistemas que permitan monitorear en tiempo real un área geográfica de gran tamaño. Para atacar esta problemática se han hecho avances bajo el concepto de la red inteligente, en donde se inició el proceso de actualizar la medición de consumo con la inclusión de medidores inteligentes, ya que su implementación es relativamente fácil en comparación a la instalación de elementos de monitoreo en la red eléctrica. El enfoque que se ha utilizado para implementar medidores en la actualidad es el de actualizar la red, para que las empresas distribuidoras de energía eléctrica tengan la capacidad de contabilizar de mejor manera el consumo eléctrico de sus clientes, y en conjunto, capturar información de su consumo para comprender mejor los hábitos de los consumidores en ciertos sectores geográficos.

El proyecto propuesto en este documento atacará la problemática desde su raíz, al desarrollar un sistema de monitoreo remoto de bajo costo y de fácil instalación que permita capturar información del comportamiento de la red eléctrica de baja tensión, para entregarle a las empresas encargadas de la distribución de energía eléctrica la capacidad de visualizar completamente su red, con el fin de mantener su funcionamiento óptimo a través del tiempo. Con esto, la red eléctrica de baja tensión podrá ser adaptada de acuerdo a las variables que afectan el funcionamiento de la red, a partir de la información entregada a la empresa de distribución, como por ejemplo, se podrá identificar cortes en las líneas de la red eléctrica, la manipulación de la red para permitir el consumo ilegal de energía eléctrica, fallas en los elementos que conforman la red, o la presencia de contaminación armónica a niveles peligrosos, a partir de la generación de alarmas y la información en tiempo real que entregue el sistema de monitoreo. En resumen, esta información generada por el sistema de monitoreo se transformará en la realimentación para el control de la red eléctrica de baja tensión.

Para simplificar el diseño del sistema de monitoreo, se decidió por utilizar la teoría de los sistemas SCADA [8] para definir los elementos que lo conforman. En este sentido, se decidió por diseñar terminales remotos (RTU) que permitan capturar los parámetros eléctricos que caracterizan el funcionamiento de la red eléctrica de baja tensión, que serán enviados de forma inalámbrica a un terminal maestro (MTU) que se encargará de administrar la información

generada, la que será visualizada por una interfaz Web (HMI) en forma de gráficos temporales en tiempo real, que además permitirá la configuración del sistema de monitoreo con respecto a los tiempos entre muestras y los parámetros eléctricos a capturar.

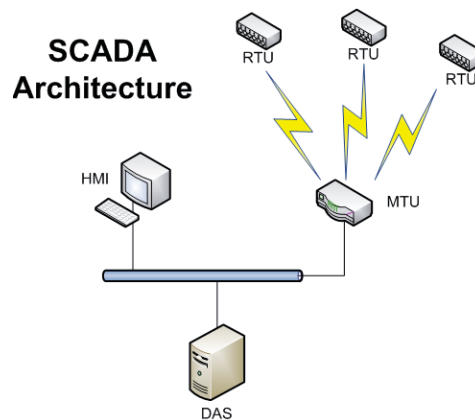


Figura 1-5 Diagrama de la arquitectura SCADA

La captura de los parámetros eléctricos estará a cargo de los terminales remotos, que serán diseñados para mantener el menor costo de producción posible, además de permitir la fácil instalación de estos elementos en la red eléctrica, sin que presenten variaciones en el funcionamiento normal de esta red. El diseño físico de estos terminales se realizará a partir de un análisis geográfico y de conectividad del lugar en donde se instalarán, a modo de elegir los componentes físicos que resistan los cambios climáticos del punto geográfico específico, y que faciliten la comunicación remota.

Los parámetros eléctricos serán capturados por un medidor de variables eléctricas, y serán analizados por un sistema eléctrico, que permita generar alarmas si identifica una variación anómala de algún parámetro medido. Esta información capturada luego se enviará a un servidor, que es conformado por un terminal maestro, un sistema de alarmas, una base de datos y un servidor Web. El terminal maestro será el encargado de comunicarse con los terminales remotos de toma de muestra, a fin de extraer los parámetros eléctricos capturados de la red de baja tensión, y así permitir la traducción de estos valores en información útil, para luego incluirla dentro de la base de datos del sistema. También se incluirá un sistema de alarmas paralelo al funcionamiento del terminal maestro, que solo se encargará de recibir paquetes de información que alerten a los clientes del sistema sobre un comportamiento crítico de la red de baja tensión. El servidor Web será el encargado de transformar la información presente en la base de datos del sistema, a fin de conformar elementos visuales para caracterizar el funcionamiento histórico de la red de baja tensión.

Con todo esto, se podrá diseñar una interfaz Web multiplataforma que permita entregar todos los elementos visuales generados por el servidor de manera gráfica, con el fin de permitir identificar claramente el estado real de la red eléctrica de baja tensión en cada punto en donde se implementen los terminales remotos. Esta interfaz visual tendrá un mapa que entregará la ubicación exacta de la ubicación geográfica de los terminales remotos, junto con indicadores de

la calidad en la comunicación de la información y la estabilidad de la red eléctrica en ese punto, y al seleccionar un punto del mapa, se entregará un resumen de los últimos parámetros eléctricos que capturó el terminal, a fin de facilitar la utilización de la plataforma para identificar con facilidad los puntos críticos que pongan en riesgo la estabilidad de la red eléctrica de manera específica. La comunicación entre estos tres elementos que conforman el sistema de monitoreo será a través de internet, utilizando la red móvil para la comunicación entre los terminales remotos y el terminal maestro, además de la conformación de un servidor en la nube que permita la interacción de los elementos del servidor con la base de datos y el servidor Web. Junto con esto, se incluirá dentro de la comunicación un sistema de encriptación y de generación de claves de acceso aleatorias, con el fin de proteger el sistema de monitoreo de ataques externos que puedan incluir información errónea o que puedan atentar contra el funcionamiento del sistema.

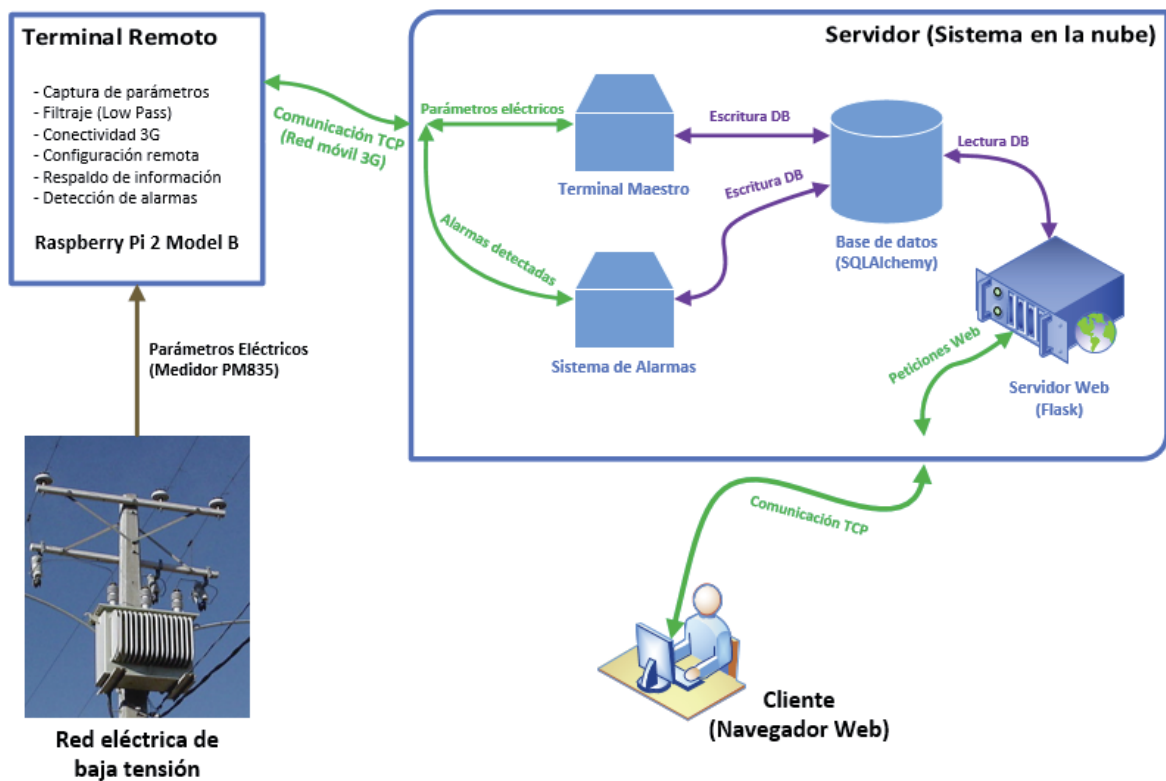


Figura 1-6 Propuesta de sistema de monitoreo remoto de redes de baja tensión

El diagrama de la figura 1-6 que representa la propuesta diseñada fue la guía para el desarrollo completo del proyecto, en donde se analizaron cada uno de los tres elementos principales que lo conforman de manera separada, a fin de facilitar el diseño de software y hardware, pero sin perder la idea del sistema en su totalidad. En los siguientes capítulos se entregarán los estudios de los componentes que los conforman, el diseño, el desarrollo y el resultado final de la implementación de cada elemento por separado, para luego realizar pruebas de funcionamiento del sistema de monitoreo completo, a fin de caracterizar en primera instancia cada elemento por sí mismo, y con esto, entregar un análisis de cómo estos tres componentes interactúan dentro del sistema de monitoreo diseñado.

1.3.4 Objetivos del proyecto

Bajo los análisis presentados anteriormente, se definió como objetivo general del proyecto el diseño, desarrollo, implementación y análisis de resultado de un sistema de monitoreo remoto de las redes de baja tensión de bajo costo, no invasivo, de fácil instalación y que permita entregar una visualización de los parámetros eléctricos que caracterizan la red de baja tensión en tiempo real.

Los objetivos específicos de este proyecto fueron planteados en orden de desarrollo, con el fin de guiar el desarrollo completo de este proyecto.

- ❖ Definir la propuesta de sistema de monitoreo para el desarrollo de este proyecto
- ❖ Analizar y seleccionar los componentes de hardware y software necesarios para conformar el sistema
- ❖ Construir un prototipo físico de los terminales remotos para la toma de muestras
- ❖ Desarrollar herramientas de software que permitan la captura, administración y visualización de parámetros eléctricos
- ❖ Realizar una prueba del funcionamiento total del sistema de monitoreo
- ❖ Llevar a cabo un análisis económico y de desempeño en base al proyecto terminado

2 Diseño de la propuesta

En este capítulo se presentará un análisis de los componentes que conforman el sistema de monitoreo remoto, junto con las alternativas de hardware y software existentes en el mercado actual para llevar a cabo su diseño y desarrollo. Este análisis permitió la elección de los componentes finales para la construcción del prototipo final, que contemplan los tres elementos identificados anteriormente, los cuales son los terminales de toma de muestras, el servidor que gestiona la información capturada, y la visualización gráfica del comportamiento de la red de baja tensión.

2.1 Elementos del sistema

A modo de facilitar la selección de componentes para la construcción del sistema de monitoreo, se identificaron los componentes internos de cada uno de los tres elementos que conforman el proyecto diseñado, a partir de la naturaleza que define a cada elemento por sí mismo, a modo de caracterizarlos dentro del contexto presente en este proyecto en base a las herramientas de software y hardware que los constituyen como sistema.

2.1.1 Terminal de toma de muestras

El diseño del sistema de monitoreo para redes de baja tensión se basa en la toma de muestras desde lugares remotos, en donde el terminal diseñado debe cumplir con los requerimientos físicos para soportar el clima específico que afecta al punto geográfico en donde se implementará. Este factor es el punto más importante dentro de la selección de los componentes físicos que permiten la construcción del dispositivo.

La captura de los parámetros eléctricos desde la red de baja tensión debe cumplir con dos requisitos específicos, los cuales son la facilidad de instalación de los elementos que permitan capturar la información desde la red eléctrica, y la implementación interna de un medidor de variables eléctricas con la capacidad de extracción de los parámetros medidos. Para la extracción y manipulación de los parámetros capturados por el medidor de variables eléctricas, se debe utilizar un sistema electrónico capaz de establecer una comunicación constante con el medidor a través de los protocolos establecidos para la comunicación entre dispositivos electrónicos. Esta capacidad de cómputo debe ser lo suficientemente rápida y fiable para permitir la obtención de los parámetros eléctricos, para luego analizarlos con el fin de identificar cambios anómalos

presentes en la red de baja tensión. Todo lo señalado anteriormente se basa en la utilización de herramientas de software que acompañen el funcionamiento físico del terminal remoto, y la utilización de una placa electrónica que ejecute el proceso de extracción de memoria desde el medidor de variables eléctricas. Otro factor a considerar, es la alimentación de los componentes electrónicos dentro del terminal, por lo que es necesario incluir elementos de transformación de corriente continua a alterna, junto con la regulación de tensión que permita la alimentación de elementos electrónicos que utilicen distintos niveles de tensión de entrada. Junto con esto, se debe incluir una batería de respaldo para entregarle autonomía de la red en casos del corte del servicio eléctrico, ya que el terminal remoto debe ser capaz de identificar este problema para reportarlo al sistema de monitoreo diseñado.

Para la comunicación externa con el terminal maestro, es necesaria la utilización de un modem para permitir la conexión hacia la red móvil de internet. Este dispositivo a través de las herramientas de software que acepte la placa electrónica que lleve a cabo el control dentro del terminal remoto, y debe ser seleccionado a partir de la disponibilidad de comunicación móvil presente en el lugar geográfico en donde se implemente el terminal remoto. La elección de la red móvil a utilizar para la comunicación remota de los parámetros eléctricos capturados será presentada en profundidad en la caracterización de la comunicación del sistema completo.

A partir de este análisis, se identificaron los componentes que permiten la conformación del terminal remoto para la toma de muestras, que basa su funcionamiento en el control de elementos físicos en base al desarrollo de herramientas de software. Este proceso se llevará a cabo dentro de una placa electrónica, que permita administrar los recursos físicos y de software de manera rápida y estable en el tiempo. Estos componentes se detallan en la siguiente lista.

- Medidor de variables eléctricas
- Dispositivos no invasivos para la medición de corriente y tensión
- Placa electrónica
- Fuente de poder para la transformación AC a DC
- Elementos de regulación de tensión continua
- Batería
- Modem de comunicación móvil
- Gabinete

Los elementos físicos para la fijación de los componentes dentro del gabinete, y las herramientas necesarias para la construcción no fueron parte de este análisis, ya que su utilización no afecta en la definición del terminal remoto como sistema.

2.1.2 Administración de parámetros capturados

Dentro de la propuesta del proyecto diseñado, se presentó el servidor del sistema como un elemento de gestión de la información capturada, lo que comprende la extracción de los parámetros eléctricos desde los terminales remotos, junto con la captura de las alarmas generadas a consecuencia de la presencia de un comportamiento anómalo dentro de la red. Además de esto, se incluye una base de datos capaz de almacenar toda la información generada

por el sistema, y el servidor Web que permita la conformación de elementos gráficos en base a los elementos dentro de la base de datos. Estos cuatro elementos presentes en el servidor se ejecutan a partir de herramientas de software específicas para cada uno de ellos, ya que cada uno de estos elementos necesita analizar y trabajar con la información de la red eléctrica de distinta manera, pero sin perder la interacción necesaria entre cada uno de ellos

En este sentido, se debe estandarizar el proceso de generación de estas herramientas de software, en base al lenguaje de programación que se utilice para cumplir este objetivo, ya que el desarrollo de software es transversal a todas las áreas que intervienen en el sistema de monitoreo remoto. Para los casos específicos de la implementación de la base de datos dentro del desarrollo de software, y en la generación del servidor Web para la visualización de los parámetros eléctricos capturados, es necesario elegir plataformas de desarrollo en base al lenguaje de programación elegido, que permitan llevar a cabo la implementación de estos procesos dentro del servidor.

El servidor propuesto debe permitir la ejecución de todos los elementos mencionados anteriormente de forma continua y estable durante el periodo de tiempo que este implementado el sistema de monitoreo en la red eléctrica, además de permitir que la comunicación entre todos los elementos que conforman el proyecto esté disponible en todo momento. Bajo este concepto, el servidor debe estar establecido en una plataforma en la nube, que cumpla con los requisitos de estabilidad, disponibilidad y capacidad de almacenamiento que requiere el proyecto. La utilización de esta plataforma define el concepto de servidor presentado en la conformación de la propuesta de este proyecto, debido a que contendrá a todos los elementos de administración de la información dentro de un solo sistema en la nube. A continuación se presentan los componentes que debe presentar el servidor para cumplir los objetivos analizados anteriormente.

- Plataforma de servidor en la nube
- Terminal maestro
- Sistema de alarmas
- Base de datos del sistema
- Servidor Web

El lenguaje de programación a utilizar no es considerado un elemento que caracteriza al servidor de administración de información, dado que es una herramienta transversal a todo el proyecto, y será analizado en profundidad en la selección de los componentes, a modo de elegir un lenguaje de programación que cumpla con los requisitos totales del sistema.

2.1.3 Interfaz Web

La visualización del comportamiento de la red de baja tensión es el elemento fundamental que caracteriza a este proyecto, y bajo este concepto, es necesario conformar una interfaz de fácil utilización que permita entregarle al usuario final del sistema de monitoreo las herramientas para la toma de decisiones para mejorar la distribución de energía eléctrica, ya sea identificando problemas en puntos específicos de la red, o por la generación de análisis a partir de la información que le entregue el sistema de monitoreo.

Anteriormente se decidió por atribuirle la conformación de los elementos gráficos al servidor Web, pues al asignarle la capacidad de manipulación de variables al servidor, disminuye el consumo de recursos desde el punto de vista del cliente que utilice la interfaz visual, por este motivo, la interfaz diseñada solo se encargará de representar estos elementos visuales de forma ordenada y lógica, a fin de facilitar la experiencia del usuario.

Dentro de los elementos que se deben incluir dentro de la interfaz visual, se encuentra la utilización de un mapa geográfico que le entregue al usuario la posición exacta de la ubicación de los terminales remotos en la red de baja tensión, junto con indicadores visuales para facilitar la identificación de problemas de manera global, además de incluir toda la información capturada desde la red en forma de texto y de gráficos temporales, ya que esto permitirá al cliente analizar de forma detallada el estado de la red de baja tensión en un espacio temporal definido. Otro elemento importante para facilitar la visualización de la red por parte del usuario final, es la implementación de un apartado dedicado a la entrega de las alarmas del sistema, ya que este elemento es la herramienta principal para identificar rápidamente problemas en la red. Bajo estas consideraciones, a continuación se presentan los elementos gráficos que definen a la interfaz visual

- Mapa geográfico con indicadores de funcionamiento
- Gráficos temporales e información en forma de texto
- Sistema de alarmas
- Panel de control de administrador, para la configuración remota

Para permitir la configuración de forma remota del funcionamiento del sistema de monitoreo, es necesario incluir un panel de control para los usuarios identificados como administradores del sistema, que permita cambiar parámetros como la selección de las variables a capturar y los tiempos de espera entre la toma de muestras. Este panel de control modificará la configuración del sistema completo, y los elementos presentes dentro de él se deben seleccionar tomando en cuenta la reacción del sistema al cambio de sus parámetros de funcionamiento.

2.2 Características principales

Para definir la propuesta de sistema de monitoreo se decidió por dividir su desarrollo en tres áreas, la medición de los parámetros eléctricos, la administración de las unidades de medición y la interfaz visual para entregar la información al usuario final. La interacción de estos tres elementos dentro de un sistema en común presenta características transversales, y por este motivo es necesario analizarlas y representarlas para guiar el desarrollo de estos elementos por separado.

2.2.1 Visualización en tiempo real

El concepto de tiempo real es relativo a la implementación de los sistemas de monitoreo, a consecuencia de las capacidades de cómputo y la fluctuación de las variables medidas, lo que presenta un problema al no poder representar el comportamiento de un sistema de manera análoga.

En el análisis realizado al decreto supremo 327, se identificaron artículos que definen la clasificación de las interrupciones en la red dependiendo del tiempo de estas, y parámetros que contemplan la energía perdida dentro de estas interrupciones. Para el desarrollo de este proyecto no se tomarán en cuenta estos conceptos, a causa de que el proyecto de monitoreo de la red de baja tensión será un complemento a la política de monitoreo de las empresas distribuidoras, y se deben seguir los protocolos impuestos por el decreto supremo para redactar los informes solicitados por la superintendencia de electricidad y combustibles en esta materia.

Con respecto al monitoreo de los parámetros que siguen el concepto de calidad de servicio eléctrico, el decreto supremo solo expresa un intervalo mínimo de diez minutos entre mediciones para el análisis de las componentes armónicas de tensión, por este motivo, se decidió por adaptar este intervalo temporal para la definición de tiempo real en el sistema de monitoreo diseñado. Cada diez minutos, el terminal maestro ejecutará la petición de los parámetros eléctricos capturados desde la red de baja tensión, y serán almacenados en la base de datos del sistema. Cabe destacar que este tiempo entre muestras puede ser configurado de forma remota, dentro del panel de control presente en la interfaz visual, debido a que este valor de iteración se ejecuta dentro del servidor de administración de la información capturada.

2.2.2 Comunicación

Dentro del desarrollo del terminal remoto de toma de muestras, se identificó importancia de la comunicación de los parámetros capturados hacia el terminal maestro, ya que la presencia de un error en esta primera etapa pone en riesgo la estabilidad total del sistema de monitoreo. A partir de esto, solo se pudo analizar la conectividad de la red de internet móvil dentro del terreno urbano, ya que los errores de comunicación de los parámetros eléctricos solo son atribuibles a fallas en la conexión a esta red, junto con el hecho de que es imposible predecir la existencia de un comportamiento humano o climatológico que ponga en riesgo la integridad física del terminal remoto.



Figura 2-1 Conexiones a internet fijo y móvil

Según datos entregados por la Subsecretaría de Telecomunicaciones [9], la utilización de internet bajo las redes móviles ha crecido a un ritmo aproximado de 14% durante la última década, mientras que las conexiones a internet por la red fija se han mantenido constantes. Este fenómeno se debe al avance de la telefonía móvil, junto con la implementación de las redes 2G, 3G y 4G en el área urbana del país. En la figura 2-1 se puede observar la gráfica presentada en el informe del año 2015 generado por la Subsecretaría de Telecomunicaciones, en donde se muestra que el 79,2% de todas las conexiones a internet realizadas en el país fueron generadas a partir de la red móvil, lo que resalta la estabilidad y el aumento en la disponibilidad de la red móvil a través del territorio del país.

En el caso específico de la utilización de internet a partir de la red móvil, se observó en el año 2015 que la mayor parte de las conexiones realizadas fueron a partir de la utilización de la red 3G. Esta información se puede observar en la figura 2-1, en donde también se observa la disminución constante que presenta la red 2G en la utilización por parte de los usuarios de la red móvil, debido a la actualización en las bandas utilizadas por los teléfonos celulares desde la red 2G a la red 4G.

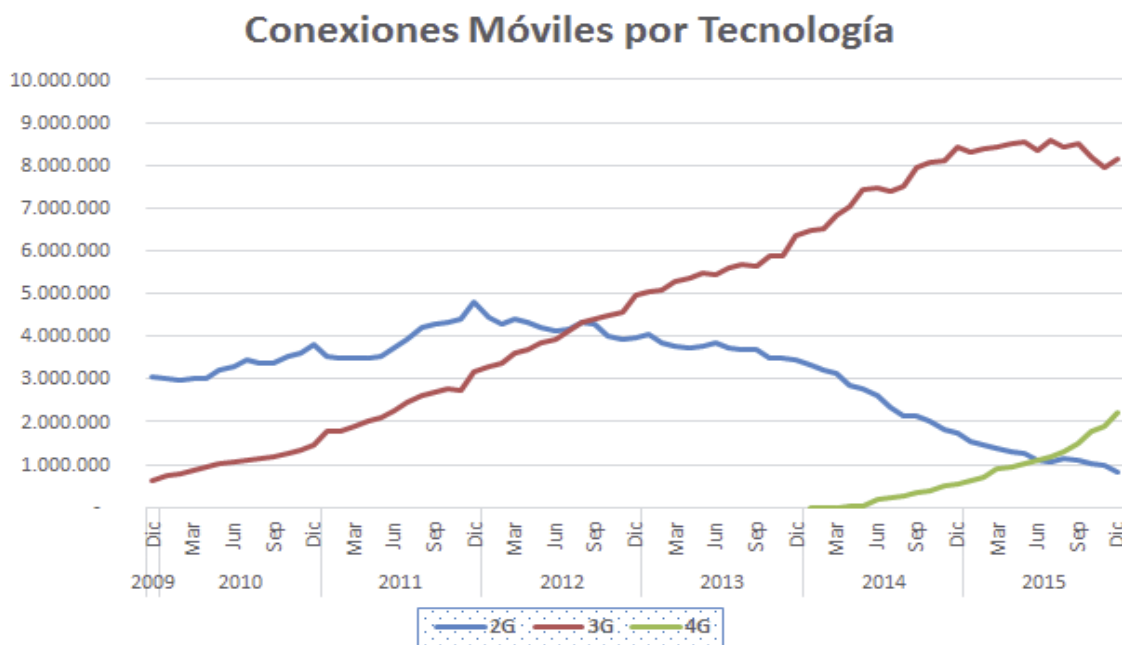


Figura 2-2 Conexiones móviles por tecnología utilizada

A partir del análisis presentado anteriormente, se decidió por implementar la comunicación de los parámetros eléctricos desde el terminal remoto hacia el servidor bajo la red 3G, a partir de la selección de un modem de comunicación que permita la conexión a esta red móvil. Esta selección se basa en la estabilidad, disponibilidad y en el uso cotidiano de la red 3G en todo el territorio del país, además de los avances que se han hecho en la implementación de esta red, y en el bajo costo que presentan los dispositivos que permiten la conexión a la red 3G. La selección del modem a utilizar para la construcción de los terminales remotos se presentará en detalle en el análisis de hardware para la selección de componentes.

2.2.3 Flexibilidad del sistema

Al diseñar la propuesta del sistema de monitoreo remoto a partir de tres áreas de desarrollo, se generó la posibilidad de tratar al proyecto completo como la unión de subsistemas independientes, en donde la comunicación entre cada uno de ellos permite la capacidad de visualizar el comportamiento de la red de baja tensión. Bajo este concepto, es posible modificar cada uno de estos subsistemas para que se adapten de mejor manera a los cambios en el ambiente en donde se implementarán, ya sea en el ámbito del desarrollo de software, en la comunicación entre los elementos que conforman el sistema, o de manera física en la instalación de los terminales remotos en la red eléctrica. Esta capacidad de adaptabilidad debe ser considerada cada vez que se desee implementar el sistema de monitoreo remoto, ya que las variables presentes en el ambiente son distintas para cualquier lugar geográfico en donde se desee llevar a cabo el proceso de monitorear la red de baja tensión. Por este sentido, se plantea la necesidad de analizar la comunicación de datos bajo la red de internet móvil, el clima específico en el lugar geográfico en donde se instalarán los terminales de toma de muestras, y la cantidad de información que manejará el sistema completo, a modo de adaptar al sistema para que su funcionamiento acepte de mejor manera las variables presentes en el ambiente. Esta característica de flexibilidad se complementará con la inclusión de elementos que permitan la configuración remota del sistema en su totalidad, a partir de la modificación de variables desde la plataforma visual, que serán interpretadas por los elementos internos que afecte esta configuración.

2.3 Selección de componentes

A continuación se presentará un análisis de los componentes electrónicos que componen la red de monitoreo a diseñar, junto con las alternativas de hardware y software existentes en el mercado actual. Este análisis permitió la elección de los componentes finales para el desarrollo del prototipo final, además del diseño del diagrama final del proyecto con todas las partes que lo definen.

2.3.1 Análisis de Hardware

El elemento de hardware más importante para asegurar el funcionamiento correcto del sistema de monitoreo remoto, es la placa electrónica encargada del control del terminal remoto, puesto que esta debe poseer una capacidad de cómputo adecuada para adquirir los parámetros eléctricos capturados por el medidor de variables eléctricas, para luego almacenarlos dentro de su memoria interna y filtrarlos para eliminar errores en la toma de muestras, junto con la capacidad de identificar el comportamiento anómalo de la red eléctrica de baja tensión, y permitir la generación de paquetes de información para ser enviados a través de la red de internet móvil. Todos estos procesos de manipulación de información deben llevarse a cabo dentro de los intervalos de tiempo de 10 minutos.

A partir de los requerimientos de una gran capacidad de manipulación de información, se decidió por utilizar computadores de placa única para el control de los elementos de hardware y software presentes en el terminal remoto, ya que estos sistemas permiten la comunicación serial para la extracción de los parámetros eléctricos desde la memoria interna del medidor de variables

eléctricas, además de permitir la configuración nativa del modem para la comunicación por la red de internet móvil. Otros factores considerados en la elección de los computadores de placa única fueron su reducido tamaño y la existencia de una gran variedad de alternativas en el mercado actual. Estos computadores de placa única basan su funcionamiento a partir de la utilización de distribuciones Linux, lo que facilita la programación del firmware del dispositivo, ya que esto permite el desarrollo de software bajo la gran variedad de lenguajes de programación soportados por estos sistemas operativos.

Para la elección del computador de placa única a utilizar en este proyecto, se realizó un estudio de los productos con mayor presencia en el mercado actual, presente en la tabla 2-1, que permitió contrastar el costo de adquisición de la placa, la disponibilidad en el mercado, las especificaciones técnicas, la capacidad de memoria presente y el tamaño del dispositivo.

Tabla 2-1 Computadores de placa única

Nombre	Precio (USD)	Disponibilidad	Especificaciones técnicas	Memoria	Tamaño (mm)
Onion Omega	\$ 25	> 1000	400MHz, 64MB RAM	16MB	28 x 32
Raspberry Pi 2	\$ 35	> 60000	Quad-core 900MHz, 1GB RAM	MicroSD	86 x 56
BeagleBone Black Rev.C	\$ 40	> 1500	1GHz, 512MB RAM	MicroSD	86 x 54
Banana Pi	\$ 53	Sin información	Dual-core 1GHz, 1GB RAM	MicroSD	92 x 60
Intel Galileo Gen 2	\$ 80	> 5000	400MHz, 256MB RAM	MicroSD	72 x 124
PandaBoard ES	\$ 182	Sin información	1GHz, 1GB RAM	MicroSD	102 x 114

En el análisis de mercado realizado, se destaca la placa Raspberry Pi [10] por sobre el resto, dado que presenta la mayor disponibilidad en el mercado actual, además de tener una gran capacidad de computo manteniendo un precio considerablemente bajo. Estos factores, junto con cumplir con los requerimientos de almacenamiento y tamaño físico requeridos para el diseño del terminal remoto, hacen que sea la mejor opción de computador de placa única presentes en el mercado. Otros beneficios que presenta la placa Raspberry Pi por sobre las demás alternativas analizadas, es la gran cantidad de documentación en línea que ofrece, generada por las mismas personas que utilizan esta placa para el desarrollo de proyectos de hobby como proyectos industriales. Esta característica asegura la continuidad en la producción de esta placa en el tiempo, a partir del gran número de proyectos desarrollados a partir de la utilización de la placa Raspberry Pi para el control de dispositivos electrónicos. Esta continuidad se ve reflejada en las actualizaciones que han presentado las placas Raspberry Pi en el último tiempo.

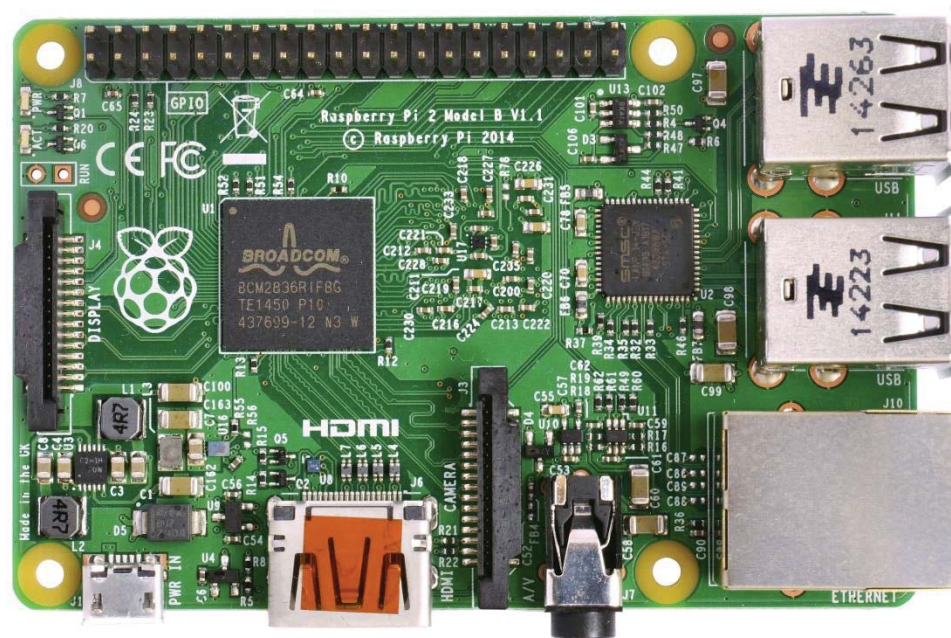


Figura 2-3 Placa Raspberry Pi 2

La placa Raspberry Pi 2 fue lanzada al mercado en febrero del año 2015, la que mantiene las mismas dimensiones físicas y el mismo costo de adquisición de su antecesora. Esta placa cuenta con cuarenta conexiones digitales input/output, cuatro puertos USB, un puerto Ethernet y una salida de video HDMI, lo que permite que esta placa sea utilizada directamente como un computador, facilitando la programación y configuración de ella.

Para la selección del medidor de variables eléctricas que incluirá el terminal remoto, se buscaron alternativas que cumplieran con los requisitos del proyecto presentados anteriormente, como la habilidad para llevar a cabo la captura de los parámetros eléctricos con el mínimo de error de medición posible, además de permitir la lectura de la mayor cantidad de variables eléctricas posibles, sin presentar un gran costo de adquisición a modo de limitar el costo de producción de los terminales remotos. Junto con esto, también se tuvo que tomar en consideración la existencia de algún tipo de comunicación serial presente en el medidor de variables eléctricas, que se administre a partir de algún protocolo de comunicación sencillo, para permitir la extracción y manipulación de la memoria interna del dispositivo a través del desarrollo de software.

Al realizar un análisis de mercado, se descubrió que existe una vasta cantidad de medidores de variables eléctricas que cumplen con los requisitos del proyecto, en donde el único factor que los diferenciaban era el tamaño y los rangos de medición. Por este motivo, se decidió por la utilización del medidor Forlong PM835, que dentro de sus especificaciones técnicas incluye la medición de 80 armónicas de tensión y corriente, la distorsión armónica de tensión y corriente, los parámetros de tensión de línea y entre líneas, la corriente, además de calcular la potencia que fluye por la red y la energía. Este medidor permite la medición trifásica, junto con la inclusión de un puerto serial para la comunicación a través del protocolo Modbus [11].



Figura 2-4 Medidor Forlong PM835 y una bobina Rogowski

Otro elemento que se incluyó en esta selección de componentes fueron las bobinas Rogowski, ya que estos dispositivos permiten la medición de corriente de forma no invasiva, protegiendo al medidor de variables eléctricas de alzas de corriente junto con permitir la medición de un mayor rango en relación a los parámetros relacionados con la corriente eléctrica. El único inconveniente que se presenta la utilización de estas bobinas es la necesidad de adquirir un integrador para su conexión al medidor de variables eléctricas, lo que aumenta su costo de adquisición, además de requerir una alimentación de tensión continua que esté aislada con respecto a la comunicación serial. El precio de mercado de cada bobina junto a su integrador es de 60 dólares, y es el único ítem de hardware que no se puede eliminar o cambiar para ahorrar en el diseño del prototipo final. Por esto se asume un costo de adquisición de tres bobinas Rogowski junto a sus integradores por 180 dólares.

El medidor Forlong PM 835 tiene una disponibilidad del mercado de mil unidades al mes, y el precio de adquisición puede ser fijado en conjunto al distribuidor. Con respecto a la medición de parámetros eléctricos, el dispositivo está clasificado como un medidor de variables eléctricas de clase 1, lo que significa que a plena carga su error de medición es aproximadamente un 1%. Sus dimensiones son de 50 por 50 centímetros y permite la visualización de las variables medidas a través de una pantalla LCD o a través de la comunicación RS485, pero para el desarrollo del prototipo es irrelevante el funcionamiento correcto en la pantalla del medidor, ya que todos los parámetros eléctricos capturados serán extraídos desde el medidor para ser observados a través de la interfaz visual

Bajo la decisión de utilizar la red móvil 3G para la comunicación de los parámetros capturados hacia el servidor, se decidió utilizar un modem de fabricación China para disminuir el costo de producción del prototipo. Este medidor será configurado de forma nativa dentro de la distribución Raspbian utilizada en la placa Raspberry Pi, lo que ayudará a que la comunicación del terminal remoto con el terminal maestro se ejecuten directamente a través de redes TCP, sin la utilización de los comandos de Hayes, que son el protocolo estándar dentro de la comunicación con módems.



Figura 2-5 Modem 3G

El modem 3G elegido tiene un costo en el mercado que fluctúa entre los 30 a 50 dólares, y tiene una disponibilidad de compra de mil dispositivos al día, lo que permite que el desarrollo de los terminales remotos no se vea afectado por la disponibilidad de compra de este elemento de hardware.

2.3.2 Análisis de Software

Para la elección del lenguaje de programación y las herramientas de software a utilizar, se necesita tomar en cuenta otros factores aparte de la construcción del terminal remoto, tales como la disponibilidad de lenguajes de programación en la placa de desarrollo, la uniformidad de lenguajes de programación en las tres áreas del proyecto, la velocidad de computo necesaria en la toma de muestras y la facilidad para programar y entender el código fuente final. La elección de la placa Raspberry Pi para la unidad de manipulación de datos entrega un amplio espectro en los lenguajes de programación disponibles para programar en este sistema, debido a que al utilizar una distribución Linux asegura que la mayor parte de los lenguajes de programación disponibles funcionen correctamente en el sistema operativo. A partir de esto, se decidió analizar solo lenguajes de programación que funcionen nativamente dentro de la distribución Linux, ya que la utilización de lenguajes emulados podría generar problemas en el funcionamiento del firmware a desarrollar, junto con poner en riesgo la estabilidad de la placa. En este estudio tampoco se analizaron lenguajes de programación experimentales y abstractos por las mismas razones expresadas anteriormente, aparte de interferir con la capacidad de entendimiento del código fuente por su complejidad. Otro factor para definir el lenguaje de programación, fue la velocidad en la toma de muestras, a modo de cumplir con el concepto de tiempo real analizado anteriormente. Este punto permitió ampliar la selección de los lenguajes de programación a los lenguajes de alto nivel, ya que este tiempo de muestreo de diez minutos es considerablemente grande en comparación a otros proyectos de monitoreo, que requieren la toma de muestras a una mayor frecuencia para caracterizar el comportamiento de sistemas que presentan mayor variabilidad en sus componentes.

A partir de estos requerimientos de software, se decidió por la elección del lenguaje de programación Python 2.7 para el desarrollo de software de forma transversal en este proyecto. Este lenguaje cumple con la facilidad en el diseño de software y no presenta un gran consumo de recursos dentro del sistema operativo, junto con incluir librerías desarrolladas específicamente para la comunicación de dispositivos electrónicos en la placa Raspberry Pi, además de la posibilidad de generar software que ejecute procesos múltiples, que es uno de los mayores requisitos al momento de desarrollar el firmware para el control del terminal remoto. Todo lo mencionado anteriormente, es complementado por la naturaleza de Python de ser un lenguaje de código abierto, lo que no aumentará el costo de producción del prototipo.



Figura 2-6 Python

La decisión de la programación bajo el lenguaje Python será transversal al proyecto, para permitir una uniformidad en el ámbito de los lenguajes de programación, por lo que se utilizará el mismo lenguaje para el diseño del firmware de los terminales remotos y los elementos que conforman el servidor del sistema de monitoreo. Como consecuencia de esta elección, se tendrá que elegir herramientas de software para permitir la generación de los elementos que conforman el servidor del sistema, lo que contempla la integración de la comunicación con la base de datos y la creación de un servidor Web capaz de traducir la información presente en la base de datos a elementos gráficos para su presentación a través de la plataforma visual Web.

En el ámbito de las bases de datos y la gestión de información, no existe una gran diferencia entre las alternativas disponibles, a causa de que todas cumplen el mismo objetivo de almacenamiento de información a través de la ejecución de peticiones. A consecuencia de este análisis, se decidió por fijar el parámetro de elección solo a la utilización de bases de datos de código abierto para decidir la mejor alternativa. A partir de esto se decidió por utilizar el sistema PostgreSQL, debido a que su implementación dentro del servidor y los programas dedicados a interactuar con el no afecta el costo de producción del sistema. Para la administración y el mantenimiento de la base de datos se utilizará el software pgAdmin, que también utiliza licencias de código abierto y fue diseñado específicamente para interactuar con PostgreSQL. Esto permitirá analizar tablas o valores específicos dentro de las bases de datos, además de permitir la generación de respaldos de la información almacenada.

En el proceso de diferenciación de las áreas de trabajo que contempla el sistema de monitoreo remoto, se presentó el concepto de un servidor que contenga todas las herramientas capaces de gestionar la información capturada por los terminales remotos. Este servidor contempla la ejecución de la base de datos del sistema, junto con los elementos de software necesarios para cumplir el objetivo de esta área de desarrollo, por lo que se decidió la utilización de la plataforma Amazon AWS, que elimina las limitantes en el tema de la utilización de recursos, y que asegura la estabilidad del sistema completo, al permitir integrar distintos tipos de servicios específicos para la administración de la base de datos y el funcionamiento del software de gestión por separado, lo que permite tratar estas dos áreas de manera específica, sin que algún problema de estabilidad de alguna de estas áreas afecte a la otra.

En la selección de la herramienta de software para permitir la integración de la base de datos PostgreSQL, se decidió por utilizar la herramienta de software SQLAlchemy [12], ya que permite adoptar cualquier tipo de bases de datos sin la necesidad de modificar el código diseñado. Este Framework funciona a partir de la generación de clases dentro del software diseñado, lo que elimina la necesidad de generar peticiones específicas para la base de datos, y permite que al momento de cambiar la configuración estas clases se adapten automáticamente a la nueva base de datos a utilizar. La interfaz visual del sistema estará soportada a través de la herramienta de software Flask [13], que también integra el desarrollo de las bases de datos utilizando SQLAlchemy. Flask es considerado un Micro-Framework, dado que el desarrollo de software utilizando esta herramienta se basa en la programación minimalista. Esta herramienta de software crea un servidor web a través de Python, que interpreta las peticiones web dentro del código diseñado, para luego insertar la información necesaria en una plantilla HTML, lo que permite presentar esta información de forma gráfica. Ya que los dos Framework seleccionados utilizan la herramienta SQLAlchemy, se facilitará la definición de las clases de la base de datos dentro del terminal maestro y la interfaz visual, lo que permitirá la migración del sistema completo a cualquier base de datos en el futuro de forma simple y segura.

El concepto de la seguridad del sistema es transversal a todos los elementos que contiene, puesto que la presencia de una vulnerabilidad dentro de cualquiera de ellos pondría en riesgo la información administrada, e incluso podría afectar a los clientes del sistema de monitoreo. A partir de esta problemática, y a modo de proteger el sistema diseñado, se decidió tomar medidas de seguridad en todas las áreas del proyecto. Para proteger la ejecución del servidor dentro de la plataforma Amazon AWS se decidió por bloquear todos los puertos TCP y UDP del servidor, solo dejando el puerto 9999 abierto para la comunicación de los terminales remotos y el terminal maestro, y el puerto 22 para la comunicación bajo SSH, junto con la protección de esta comunicación bajo el concepto de las llaves en pares, lo que asegura que solo la persona que tenga el archivo de la llave de encriptación pueda tener acceso al SSH. Para la comunicación con la base de datos PostgreSQL también se utilizará este concepto de las llaves en pares. En el ámbito de la seguridad de la información medida en los terminales remotos, se decidió por utilizar el concepto de la encriptación Diffie-Hellman [14] para la identificación de las unidades remotas dentro del terminal maestro. La implementación de esta clave de encriptación se basa en las propiedades de la lógica modular, que permite que dos sistemas generen números aleatorios que se intercambian públicamente para generar un tercer número idéntico para los dos.

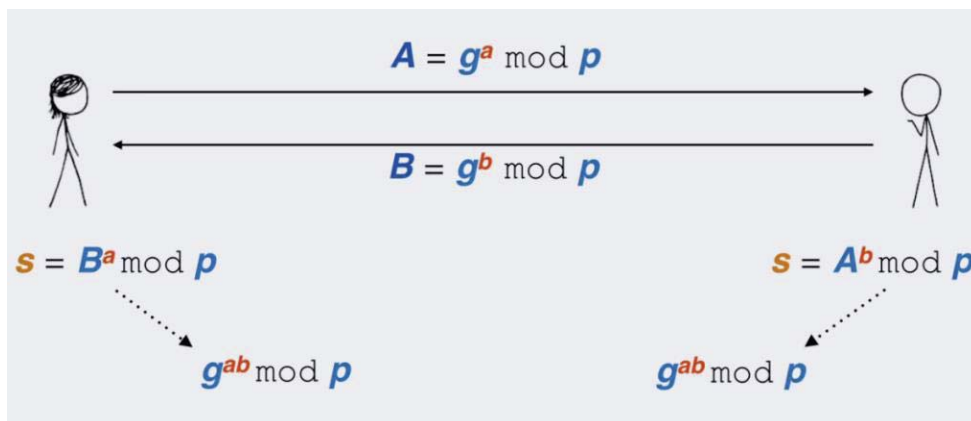


Figura 2-7 Encriptación Diffie-Hellman

En la figura 2-7 se describe el proceso para generar una clave privada entre dos usuarios, en donde la lectura de la información compartida no permite la captura de esta clave privada por sí misma, permitiendo enviar estos parámetros de manera pública sin poner en riesgo la generación de la clave de acceso. Este proceso de encriptación se divide en cuatro pasos, en donde existen solo dos interacciones entre los usuarios.

- Los dos usuarios definen un número generador G y un número primo P de manera privada
- El primer usuario genera un número aleatorio a y calcula el número A a partir del módulo entre G elevado a a y el número primo P , que luego se lo envía al segundo usuario
- El segundo usuario genera un número aleatorio b y calcula el número B a partir del módulo entre G elevado a b y el número primo P , que luego se lo envía al primer usuario
- Los dos usuarios generan su clave privada gracias a las propiedades de la lógica modular, ya que el número K es exactamente igual al calcular el modulo entre B elevado a a y el número primo P y el modulo entre A elevado a b y el número primo P

La clave privada generada por este método es igual a calcular el modulo entre G elevado al número a por b y el número primo P , por lo que si los números G y P son lo suficientemente grandes se hace imposible un ataque de fuerza bruta por parte de un atacante externo al sistema.

Este tipo de encriptación es utilizado generalmente a modo de permitir la creación de una llave de acceso, en casos en donde la comunicación entre dispositivos es de naturaleza pública. A partir de esta clave privada generada de forma pública, es posible integrar otros elementos de encriptación, que permitan proteger los paquetes de información generados en la comunicación entre los elementos del sistema, pero por motivos de protección de la información medida, y a modo de limitar el uso del ancho de banda en la comunicación bajo la red móvil 3G, se decidió por solo utilizar esta clave de acceso como forma de identificación de los terminales remotos. En el caso de la generación errónea de una llave de acceso por parte del terminal remoto, se cerrará la comunicación automáticamente entre él y el terminal maestro, en base al funcionamiento del algoritmo de creación de llaves, que solo puede ser erróneo en casos donde los números privados utilizados sean distintos a los estipulados por la configuración del sistema.

3 Construcción del terminal remoto

Dentro de la propuesta de un sistema de monitoreo remoto de las redes de baja tensión, el pilar fundamental del mismo son los terminales de captura de información, debido a que este componente es el encargado de interactuar con la red de baja tensión, a modo de obtener en tiempo real los parámetros de funcionamiento de esta red. Este proceso permite caracterizar al terminal remoto como la entrada al sistema de monitoreo, y por este motivo, se deben tomar ciertas precauciones en torno al diseño del terminal remoto, a modo de prevenir la existencia de algún problema en el funcionamiento, en la toma de muestras o en la comunicación con el servidor del sistema de monitoreo.

3.1 Implementación física

Como fue mencionado anteriormente, la construcción física del terminal remoto es un factor que depende del sector geográfico en donde se implementará el sistema de monitoreo remoto, por lo que se decidió enfocar el diseño físico de la unidad para su implementación en la región de Valparaíso. Junto con esto, se distribuyó el espacio físico del confinamiento del sistema para que presente el menor tamaño posible, pero que al mismo tiempo permita la rápida reposición de los componentes internos del terminal remoto, que corresponden a la batería interna, la placa Raspberry Pi, el medidor PM835, la fuente de regulación de tensión de 12 Volts, el modem 3G y la placa electrónica que permite el control de los componentes de hardware. En el estudio climático de la región de Valparaíso, se tuvo que tomar en cuenta la posible corrosión producida por el ambiente salino presente en los sectores cercanos al mar, por esto se decidió por la utilización de un gabinete que cumple el estándar de protección IP65, que por su construcción a base de polímeros permite asegurar la aislación de agua y polvo, además de soportar esta corrosión climática. Por otra parte, la región de Valparaíso presenta una distribución urbana compleja, ya que hay ciertos sectores en donde la densidad de población presenta niveles elevados, pero también se encuentran sectores rurales con poca población. Al presentar la idea de la implementación dentro de esta región se tuvo que analizar la conectividad 3G, que se ve afectada por la utilización en masa de esta red en sectores con gran densidad de población. Por esta razón se intentó disminuir al máximo la utilización del ancho de banda de la red 3G en el diseño del software, y no se descarta en el futuro la implementación de otros sistemas de comunicación inalámbrica que complementen la comunicación.

3 Construcción del terminal remoto

A modo de permitir la conexión del terminal remoto en la red eléctrica, se utilizó una prensa estopa, que permite sellar la salida de los cables desde el confinamiento seleccionado, y se incluyeron tenazas para la conexión a la red trifásica, que entregan los niveles de tensión alterna para la alimentación del terminal remoto y para la medición de tensión de línea, junto con las bobinas Rogowski, que permiten una conexión no invasiva para la medición de la corriente de la red de baja tensión. La alimentación es rectificadora por una fuente que entrega una tensión de salida de 12 volts dentro del terminal remoto, que permite cargar la batería interna, junto con la regulación de tensión a los niveles de 3.3V, 5V y 9V.



Figura 3-1 Estructura física del terminal remoto

La disposición de los componentes físicos del terminal remoto está presente en la figura 3-1, en donde se observa que la batería y el fuente de alimentación fueron ubicados en la parte inferior de la unidad, la placa Raspberry Pi, el modem 3G, el medidor de variables eléctricas y la placa encargada de la intercomunicación de los dispositivos fueron ubicados en la parte superior, y la antena para la comunicación 3G fue posicionada en el exterior de la unidad. Se diseñó una placa electrónica para la integración de los componentes eléctricos que complementan el funcionamiento del terminal remoto. Esta placa integra tres reguladores de tensión para entregar niveles continuos de 9, 5 y 3.3 volts, que alimentan los integradores de las bobinas de Rogowski, la placa Raspberry Pi, el modem 3G y el medidor de variables eléctricas, además de incluir un conversor analógico digital de 10 bits de ocho canales, junto con un reloj de tiempo real.

Para permitir el control de los elementos físicos que constituyen al terminal remoto por parte de la placa Raspberry Pi, se diseñó una placa electrónica que contiene los elementos esenciales para llevar a cabo esta tarea, junto con elementos que ayudan al funcionamiento correcto del computador de placa única en el transcurso del tiempo. El elemento más importante a destacar es la inclusión de un reloj de tiempo real a partir del circuito integrado DS1307, que le entrega a la placa Raspberry Pi la capacidad de mantener una estampa de tiempo constante, sin importar las interrupciones en su funcionamiento. La inclusión de este componente se llevó a cabo en base a las indicaciones descritas en la documentación de este circuito integrado, que se observa en la figura 3-2, y que se basa en la utilización de una batería de reloj, un cristal que oscila a la frecuencia de 32.768 kHz, un capacitor de desacoplo y tres resistencias en modo Pull-Up. El circuito integrado DS1307 permite la comunicación con la placa Raspberry Pi a través del protocolo i2C, que fue configurado de forma nativa dentro del sistema operativo para asegurar el correcto inicio y ejecución de la comunicación con el reloj de tiempo real.

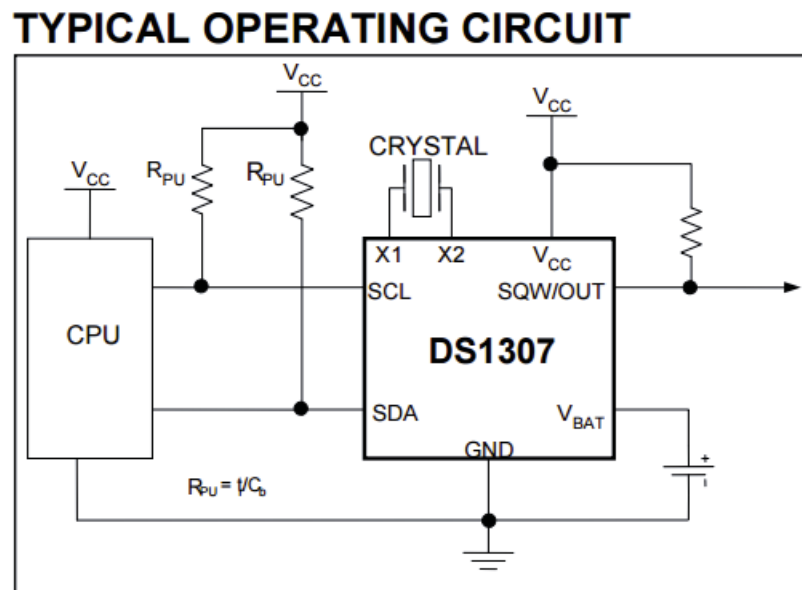


Figura 3-2 Utilización típica del circuito integrado DS1307

Junto con este elemento electrónico, se utilizó el conversor análogo digital MCP3008, que permite la lectura en paralelo de ocho canales bajo el protocolo de comunicación SPI. Este componente permitió la lectura de los niveles de tensión que utiliza el terminal remoto en su totalidad, desde la regulación de corriente alterna a los 12 Volts continuos entregados por la fuente del sistema, junto con las transformaciones a los niveles de tensión lógicos de 3.3V, 5V, el nivel de tensión presente en la batería de respaldo, y la tensión de alimentación de los integradores de las bobinas Rogowski. La salida de este componente es utilizada dentro del desarrollo de software incluido en el terminal remoto, de manera de mantener un registro de la estabilidad técnica de la unidad diseñada, y permitir la creación de alarmas para monitorear el funcionamiento óptimo de forma remota. En la figura 3-3 se puede observar el diagrama de operación entregado por la documentación de este circuito integrado.

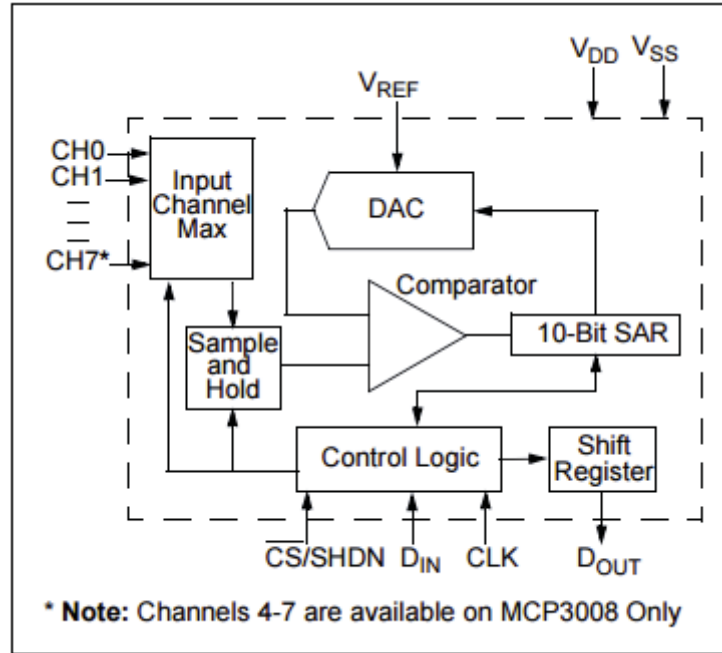


Figura 3-3 Diagrama funcional del circuito integrado MCP3008

Para la regulación de tensión continua se utilizó el circuito presente en la figura 3-4, que considera como tensión de alimentación el nivel continuo entregado por la fuente 12V. Esta tensión de entrada es utilizada para mantener la carga dentro de la batería de respaldo, para luego utilizar esta tensión para generar los niveles de 9V, 5V y 3.3V utilizados por la placa diseñada. Esto permite que la batería de respaldo actúe como la tensión de entrada al momento de existir un corte en el suministro eléctrico. Junto con esto, se utilizó el regulador ROE-0505S, que permite la generación de una tierra aislada para aislar el circuito de la alimentación de los integradores. Cabe destacar que el nivel de tensión continuo de 9 Volts no fue utilizado en el transcurso de este desarrollo, pero fue incluido a modo de permitir la integración futura de otros elementos de hardware que se alimenten a ese nivel de tensión.

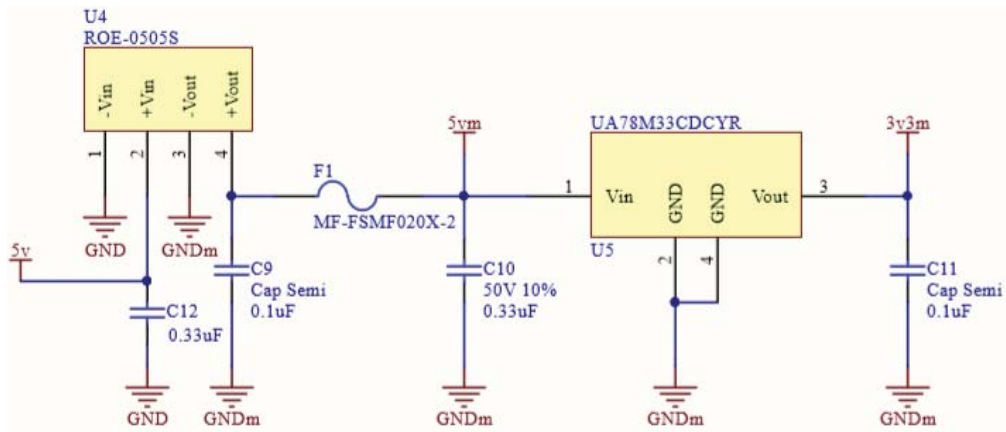


Figura 3-4 Utilización de regulador ROE-0505S

3.2 Desarrollo de software

El desarrollo de software para controlar el funcionamiento del terminal remoto presenta la estructura de un firmware de alto nivel, ya que no fue enfocado al control directo de elementos de la electrónica digital, sino que este se dedicará a la extracción de la memoria del medidor de variables eléctricas, y a la comunicación de estos parámetros hacia el terminal maestro dentro del servidor del sistema. Para facilitar el diseño del firmware, se decidió por dividir el trabajo en cuatro procesos que funcionan en paralelo dentro del sistema, los cuales contemplan la captura de los parámetros eléctricos almacenados dentro de la memoria interna del medidor PM835, el filtraje de la memoria generada por el firmware, la generación de alarmas para informar la presencia de un comportamiento anómalo del terminal remoto y de la red de baja tensión, y el diseño del algoritmo de comunicación de las variables capturadas hacia el terminal maestro. Estos cuatro procesos serán complementados por un sub proceso encargado de permitir la configuración de los tiempos de espera de estos mismos de forma remota.

3.2.1 Proceso de captura de variables externas

Anteriormente se nombraron los parámetros eléctricos que definen el concepto de la calidad del servicio eléctrico, que está normado por la superintendencia de electricidad y combustibles, y junto con esto se analizó la postura de las empresas del rubro eléctrico sobre la fiscalización y el cumplimiento mínimo de la calidad de servicio. Esto presentó un reto al momento de definir los parámetros eléctricos que serán capturados por los terminales remotos, y la visualización de estos a través de la interfaz visual del sistema, dado que la finalidad que le desee dar el cliente a la implementación del sistema de monitoreo remoto puede variar a través del tiempo. Por este motivo, se decidió capturar todos los parámetros eléctricos que es capaz de entregar el medidor Forlong PM835, pero asegurando la capacidad de selección por parte del cliente del sistema de monitoreo para la visualización de los parámetros que se deseen convenientes dentro del desarrollo de la interfaz visual del sistema. Esta característica permite adaptar el sistema al cliente final, basado en el concepto de flexibilidad presentado anteriormente. Los parámetros que captura el medidor de variables eléctricas contemplan la medición trifásica de la red de baja tensión, junto con un análisis de 60 componentes armónicas de tensión y corriente, lo que aumentó considerablemente el número de variables que incluye el terminal remoto final. Dentro de la memoria Modbus del medidor existen 592 registros, que contemplan los parámetros mencionados, además de la configuración interna del dispositivo, por lo que se utilizó esta memoria como base para el diseño de la memoria del terminal remoto.

Para permitir esta lectura de memoria, se diseñó un módulo en el lenguaje Python específico para la comunicación entre la placa Raspberry Pi y el medidor de variables eléctricas, a través de la utilización del protocolo Modbus RTU. En la tabla 3-1 se presenta una tabla explicativa con los parámetros más importantes dentro de la memoria interna del medidor Forlong PM835.

Tabla 3-1 Memoria interna del medidor de variables eléctricas

Nombre	Cantidad de variables
Identificador Modbus RTU	1
Transformador de corriente	2
Transformador de tensión	2
Baudrate	1
Frecuencia	1
Corriente	4
Tensión de línea	4
Tensión entre líneas	4
Potencia activa	4
Potencia reactiva	4
Potencia aparente	4
Factor de potencia	4
Distorsión armónica	4
Contenido armónico de tensión	180
Contenido armónico de corriente	180
Energía	3

Los primeros cuatro parámetros expresados en la tabla corresponden a la configuración en la comunicación con el medidor de variables eléctricas, que son el número identificador del protocolo Modbus RTU, los transformadores internos de corriente y tensión, que amplifican las señales medidas y permiten la calibración de los parámetros que muestra el medidor en su pantalla, y el baudrate utilizado para esta comunicación. Junto con esto, se encuentran los parámetros trifásicos y promedio que caracterizan el comportamiento de la red de baja tensión. Este conjunto de parámetros, junto con las variables capturadas desde el conversor análogo digital, que caracterizan el funcionamiento interno de la unidad, y la estampa de tiempo del momento en que se capturaron estos parámetros, conforman la memoria interna total del terminal remoto, que será utilizada de forma transversal dentro de los procesos internos del sistema.

El algoritmo dedicado a la generación de la memoria interna del firmware se presenta en la figura 3-5, que se inicia con el envío de las peticiones de lectura hacia el medidor de variables eléctricas, para luego leer los parámetros internos presentes en el conversor análogo digital. Al momento de generar esta matriz que contiene los elementos ya mencionados, se procede a ejecutar un filtraje de las variables de la matriz, a modo de acotar la variación de los parámetros leídos, y así protegerlos de la presencia de algún error en la lectura de ellos. Al terminar el proceso de filtraje, la memoria generada se encuentra en el estado final del proceso, y se almacena en forma de variable global dentro del firmware, para permitir su utilización por parte de los procesos de comunicación, filtraje y creación de alarmas. Luego de esto, el proceso entra en un estado de espera de la siguiente iteración, a partir de una variable de tiempo de espera capturada desde la interfaz visual, lo que permite estandarizar el tiempo transcurrido entre cada actualización de la memoria interna del terminal remoto.

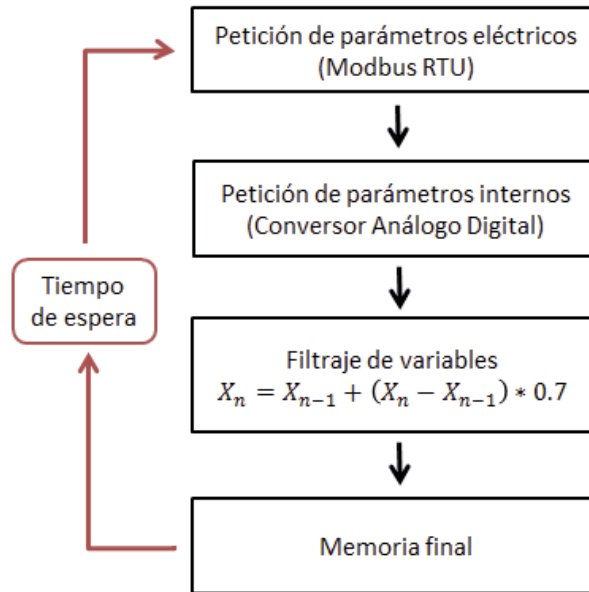


Figura 3-5 Algoritmo de generación de memoria interna

Los parámetros capturados desde el convertor análogo digital serán analizados en profundidad en el proceso dedicado a la generación de alarmas de comportamiento anómalo, y la presentación del código utilizado en este proceso se entrega en los apéndices de este documento.

3.2.2 Proceso de generación de alarmas

Siguiendo con el concepto de la calidad del servicio eléctrico, se diseñó un sistema de alarmas capaz de identificar el comportamiento anómalo en la red eléctrica a partir de la definición de calidad presente en el Decreto Supremo 327, además de incluir parámetros internos que caracterizan el comportamiento del terminal remoto. Este sistema de alarmas se diseñó para actuar como un complemento al proceso de creación de memoria, debido a que su funcionamiento correcto depende en totalidad de la captura y filtraje de los parámetros que definen el comportamiento de la red de baja tensión. La única limitante existente en la integración del sistema de alarmas en el funcionamiento del firmware es el tiempo de respuesta entre el cambio de los parámetros que definen la calidad eléctrica, ya que cada iteración del proceso presenta un tiempo de espera determinado remotamente, por esto se diseñó este sistema para enviar la información solo cuando existan cambios en el paquete de alarmas, para limitar el ancho de banda que consume el dispositivo. Este sistema de alarmas se diseñó a partir la simplificación de las indicaciones presentes en el decreto supremo 327, a modo de solo identificar cambios anómalos en la red. En total se incluyeron dieciocho variables lógicas para la generación del paquete de información, que se enviará automáticamente a un terminal diseñado específicamente para capturar esta información cuando exista un cambio lógico en alguna de las variables presentes en el paquete.

3 Construcción del terminal remoto

Tabla 3-2 Variables lógicas características de la red eléctrica

N° Byte	Variable	Condición True
Bit 1	Frecuencia	$F < 47 \text{ Hz}$
Bit 2	Tensión	$V_{r,s,t} > 229 \text{ Vrms}$
Bit 3		$V_{r,s,t} < 211 \text{ Vrms}$
Bit 4	Corriente	$I_{r,s,t} < 10 \text{ A}$
Bit 5	Factor de Potencia	$FP < 0.9$
Bit 6		$FP > 0.99$
Bit 7	Armónicos de Tensión	$V_n > 10\% * V_0$
Bit 8	Armónicos de Corriente	$I_n > 10\% * I_0$
Bit 9	Distorsión armónica Tensión	$THD_v > 5\%$
Bit 10	Distorsión armónica Corriente	$THD_i > 5\%$

En la tabla 3-2 se observan las variables lógicas designadas para la construcción del paquete de alarmas. Las primeras diez variables lógicas presentes en el paquete de información, permiten informar al cliente final sobre algún cambio perjudicial en la calidad del servicio eléctrico, tales como un cambio importante en la frecuencia de la onda del suministro eléctrico, algún cambio significativo en la tensión nominal característica de la red de baja tensión, la presencia de un corte de línea en el lugar geográfico en donde se ubica el terminal remoto, y problemas producidos por la presencia de contaminación armónica innecesaria en la red.

Tabla 3-3 Variables lógicas características del terminal remoto

N° Byte	Condición True
Bit 11	$ADC1 < 10$
Bit 12	$ADC2 < 10$
Bit 13	$ADC3 < 10$
Bit 14	$ADC4 < 10$
Bit 15	$ADC5 < 10$
Bit 16	$ADC6 < 10$
Bit 17	$ADC7 < 10$
Bit 18	$ADC8 < 10$

Para la caracterización del comportamiento interno del terminal remoto, se decidió por incluir en el paquete de información ocho variables lógicas que expresan niveles de tensión continuo presentes en el terminal remoto, con el fin de identificar problemas de hardware antes que perjudiquen la estabilidad del sistema, o que puedan poner en riesgo el comportamiento de la red eléctrica en el lugar geográfico donde estará ubicado el terminal. Estas ocho variables son capturadas gracias a un conversor análogo digital, que es leído a través de la comunicación SPI presente en la placa Raspberry Pi.

3 Construcción del terminal remoto

Cada variable lógica presente en los últimos ocho bits del paquete de información representa un valor de tensión, que alimenta algún componente interno del terminal remoto, tales como el nivel de tensión en la salida de la fuente de conversión alterna a continua, la tensión de la batería interna del dispositivo, las tensiones de 9, 5 y 3.3 Volts, además de la tensión de alimentación de la placa Raspberry Pi, del modem 3G y de los integradores para la utilización de las bobinas Rogowski.

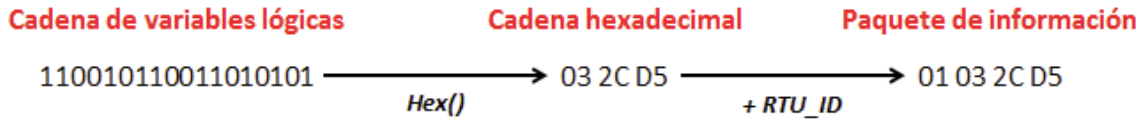


Figura 3-6 Transformación de variables lógicas

Gracias a la elección de variables lógicas para la detección de errores, se pudo diseñar un algoritmo de conformación del paquete de información, presente en la figura 3-6, que transforma las dieciocho variables lógicas en un número binario, el cual es transformado a un valor hexadecimal y es enviado junto al byte identificador del terminal al sistema de alarmas a través de la red TCP. El sistema de alarmas presentado se diseñó como un proceso complementario al sistema de monitoreo de la red de baja tensión, y por esto se tomó la decisión de utilizar un método simple de generación del paquete de información, sin utilizar ningún protocolo de comunicación existente.

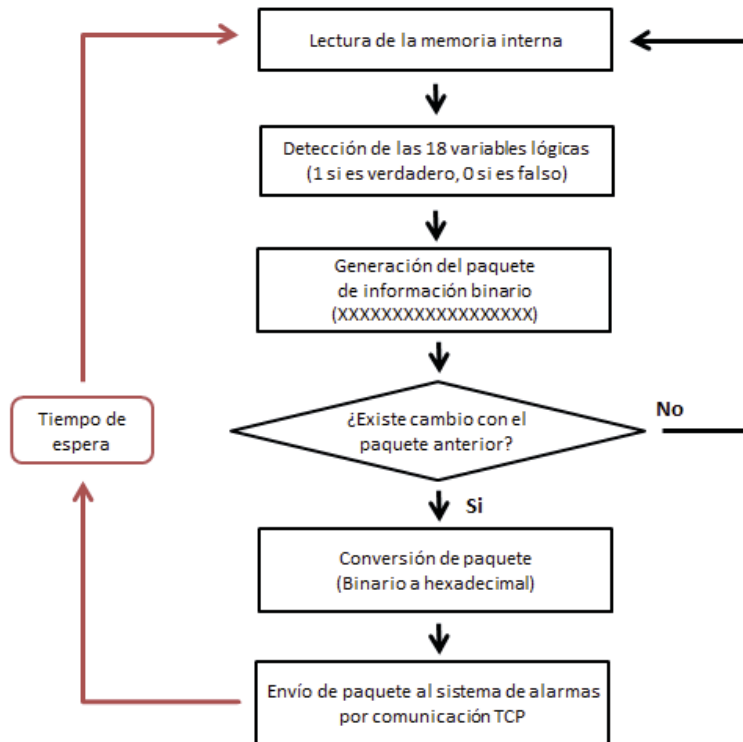


Figura 3-7 Algoritmo de detección de comportamiento anómalo

La figura 3-7 presenta el algoritmo final que expresa el comportamiento del sistema de alarmas por parte del terminal remoto, que inicia su funcionamiento leyendo las variables seleccionadas desde la memoria interna del firmware, para luego generar un conjunto de dieciocho variables lógicas que resumen el estado actual del comportamiento de la red eléctrica. Este conjunto de variables lógicas es comparado con la iteración anterior del algoritmo de detección de comportamiento anómalo, y si existió algún cambio de estado se procede a la transformación de variables y al envío del paquete de información al sistema de alarmas. Para finalizar, este sistema es pausado por un tiempo de espera determinado remotamente. En el caso específico de que no exista un cambio en las variables lógicas con respecto a la iteración anterior, el algoritmo procede a la lectura de la memoria interna hasta que exista un cambio en el estado del sistema, sin ejecutar ningún tiempo de espera entre lecturas, a modo de detectar cambios de la memoria en forma rápida y eficiente. La finalidad de este sistema es entregar una alerta simple, que le informe al usuario final que existe algún problema en el lugar geográfico en donde el terminal remoto está monitoreando la red de baja tensión, y que presente la información necesaria para tener noción del problema existente. El sistema encargado de traducir los paquetes generados por este proceso estará presente en el servidor, para permitir la entrega eficiente de esta información de modo gráfico a través de la interfaz visual del sistema de monitoreo remoto.

3.2.3 Proceso de comunicación

El tercer proceso involucrado en el funcionamiento del firmware, es el encargado de la comunicación de los parámetros de la red eléctrica hacia el terminal maestro, utilizando una conexión TCP a través de la red 3G. Este proceso es el punto principal en el funcionamiento correcto del terminal remoto como sistema de toma de muestras, además de ser el único elemento del firmware que afecta el costo de producción de la unidad, por la importancia del ahorro en el consumo del ancho de banda de la red 3G.

Por este motivo, la utilización del ancho de banda en el proceso de comunicación estará limitada por la cantidad de peticiones solicitadas por el terminal maestro, y se podrán configurar remotamente a través de una tabla dentro de la base de datos del sistema, que podrá ser manipulada por medio de la interfaz visual. Al identificar la importancia en la forma de definir la comunicación de la información medida, se decidió por dividir el desarrollo de este proceso en dos áreas, en primer lugar, el algoritmo que crea la conexión TCP con el terminal maestro, y en segundo lugar, el estándar de comunicación de variables, diseñado específicamente para este sistema. El diseño del algoritmo para la creación de la comunicación con el terminal maestro fue afectado por la naturaleza de la red 3G, en donde es imposible generar una dirección estática dentro de la red. Por este motivo, se definió al terminal remoto como un cliente TCP en el proceso de creación de la comunicación, creando el servidor TCP dentro del terminal maestro con una dirección IP estática, a la cual se apuntará al momento de la creación de la comunicación por parte del terminal remoto.

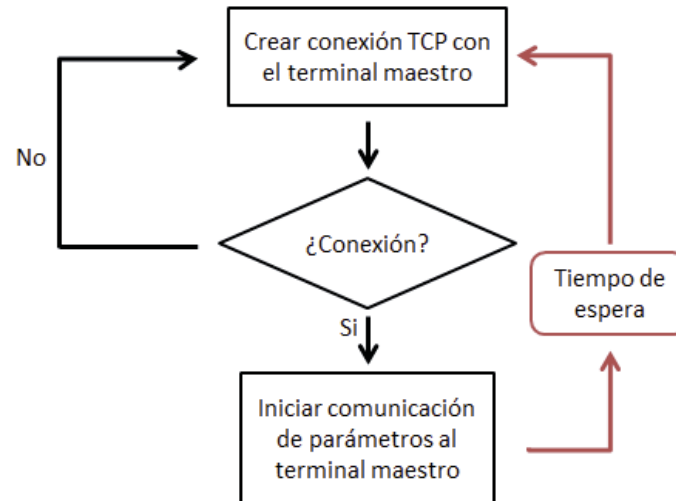


Figura 3-8 Algoritmo de comunicación

En el diagrama de la figura 3-8 se puede observar el algoritmo que describe el proceso de comunicación del firmware diseñado, el cual intenta establecer la conexión TCP con el terminal maestro un número finito de veces, y si persiste este problema forzará la reiniciación del sistema completo. Si se establece la comunicación, el proceso iniciará el estándar de comunicación de variables diseñado, para luego esperar un tiempo de espera definido remotamente para comenzar la siguiente iteración.

En el caso de la creación del algoritmo de comunicación, se identificó la incapacidad de crear un servidor TCP en el terminal remoto por la naturaleza de la red 3G, lo que afectó la definición del terminal remoto y el terminal maestro, al asignarles la cualidad de cliente y servidor al mismo tiempo. Por este motivo, el protocolo estándar de comunicación se diseñó pensando en el terminal maestro como un cliente de información, el cual le asigna la capacidad de terminar la comunicación en cualquier momento si se identifica un problema dentro del estándar. Este protocolo comienza preguntando por parte del terminal maestro el número de identificación del terminal remoto, para luego proseguir con la identificación a través de la encriptación Diffie-Hellman. En el momento de que el terminal maestro recibe las respuestas correctas, en torno al formato del número de identificación del terminal remoto, y la clave privada generada por el algoritmo Diffie-Hellman, este mismo inicia el protocolo de pregunta y respuesta con el terminal remoto.

Cuando existe una petición de información de las variables medidas, se genera automáticamente el paquete de información a partir de la memoria interna, y lo envía a través del protocolo Modbus TCP al terminal maestro cuantas veces sea configurado en la base de datos del sistema. En el momento en que el terminal maestro recibe todas las respuestas de las peticiones que necesitaba, se envía un comando de cierre de la conexión. Este proceso se puede observar en la figura 3-9, que presenta un ejemplo del intercambio de peticiones y respuestas entre el terminal maestro y los terminales remotos.

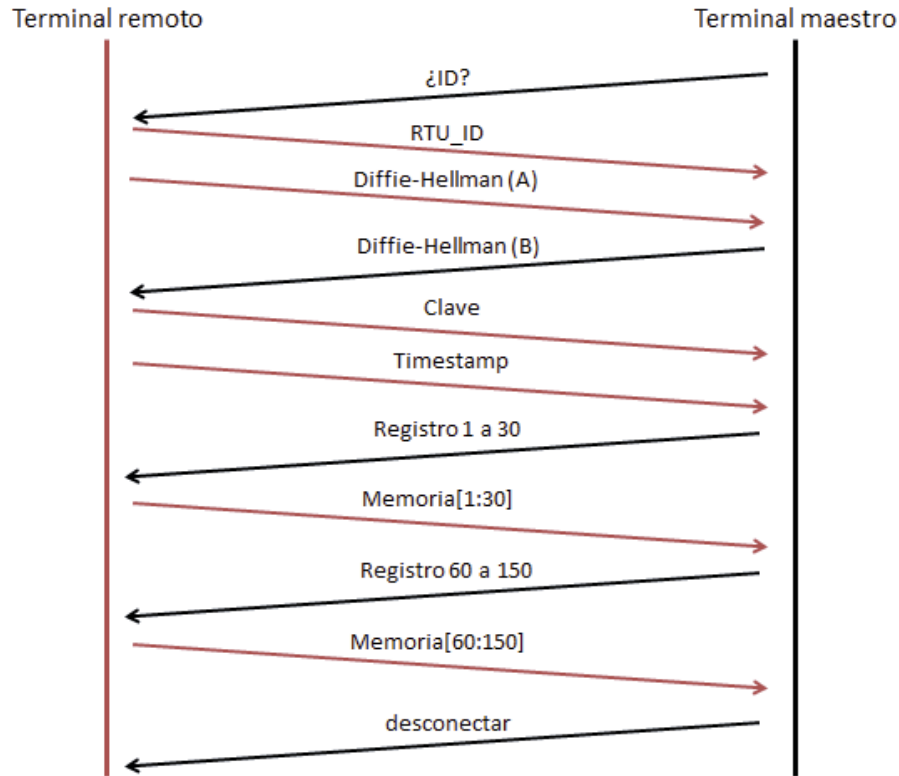


Figura 3-9 Diagrama de comunicación cliente-servidor

Al asignarle al terminal maestro la cualidad de cliente de información, se le asigna a este la capacidad de forzar el término de la comunicación en cualquier momento donde exista un problema con el protocolo estipulado, como por ejemplo, en el formato del envío del número identificador, en la respuesta en la clave generada por el algoritmo Diffie-Hellman, o si existe algún problema con el protocolo Modbus TCP, con el fin de dificultar la posibilidad de que un agente externo al sistema incluya variables anómalas a la base de datos.

3.2.4 Proceso de almacenamiento remoto de variables

El respaldo de la memoria total del firmware, permite garantizarle al cliente final del sistema que aunque existan problemas de comunicación, o cualquier tipo de fallas que presente el sistema en su funcionamiento habitual, va a existir la información histórica del comportamiento de la red de baja tensión para luego ser estudiada. Por esto, se decidió almacenar cada variable presente en la memoria como dos bytes, y la hora exacta en donde se almacenó la memoria es conservada en formato Epoch, permitiendo que cada iteración ocupe un aproximado de 600 bytes de almacenamiento. El tiempo transcurrido entre cada iteración del proceso de respaldo es configurable remotamente.

3.3 Configuración final

Para finalizar el desarrollo del terminal remoto como una unidad total, se configuraron los componentes que conforman la unidad dentro del sistema operativo Raspbian utilizado en la placa Raspberry Pi. En primer lugar se habilitó la comunicación serial y SPI para extraer la información del medidor de variables eléctricas y el conversor análogo digital, además de instalar la librería SpiDev para la integración del estándar de comunicación SPI en el desarrollo en el lenguaje de programación Python, y se configuró la interfaz I2C para incluir el reloj de tiempo real presente en la placa diseñada, para así permitir que el sistema operativo mantenga su estampa de tiempo de manera continua.

Junto con esto, se configuró el sistema operativo para utilizar el modem 3G nativamente como el dispositivo principal para la comunicación a través de internet, ya que la utilización del modem a partir de la comunicación serial limita la utilidad del dispositivo. Para esto se utilizó el software Wvdial para iniciar la conexión a internet en el inicio del sistema operativo, junto con la deshabilitación de la comunicación Ethernet nativa de la placa Raspberry Pi por motivos de seguridad. Para finalizar, se deshabilitó la comunicación SSH, se eliminaron todas las herramientas de software que no serán utilizadas por el terminal remoto, se expandió la utilización de la memoria Flash para la utilización total del espacio de almacenamiento, se configuró el inicio del sistema operativo en modo texto para ahorrar recursos de procesamiento, y para finalizar, se configuró el firmware diseñado para iniciarse automáticamente junto con el sistema operativo. Con esto se logró que la placa Raspberry Pi utilice el mínimo de recursos de software y hardware, con el motivo de asegurar que el firmware no encuentre problemas dentro de su funcionamiento en el sistema operativo.

4 Servidor de gestión de datos

A partir del diseño de los terminales remotos para la captura de parámetros eléctricos, se diseñaron los elementos que conforman el servidor del sistema, en donde se incluye un terminal maestro para permitir la comunicación entre el servidor con los terminales remotos, el sistema de alarmas para detectar cambios anómalos en la red eléctrica, además de la base de datos PostgreSQL y el servidor Web generado por la herramienta de software Flask. A continuación se presenta la caracterización de cada elemento interno del servidor, junto con el desarrollo de software realizado para cumplir los objetivos específicos de estos sistemas.

4.1 Definición de los elementos internos

El servidor de administración de información consta de cuatro componentes independientes, que permiten que exista un flujo de información a través del sistema de monitoreo, a modo de convertirse en el elemento central que conecta a los terminales remotos con la visualización de los parámetros eléctricos capturados desde la red eléctrica de baja tensión. Los componentes de software que incluye el servidor son el terminal maestro, que se encarga de extraer los parámetros eléctricos desde los terminales remotos, corresponden al sistema de alarma para administrar las alertas generadas, la base de datos que almacena la información del sistema, y el servidor Web, que es el encargado de entregar de forma visual los elementos almacenados en la base de datos. El funcionamiento de estos componentes se ejecuta sobre la plataforma Amazon AWS, en donde se proporciona una instancia de ejecución de una distribución Linux, accesible a partir de la comunicación SSH.

4.1.1 Terminal maestro

Para la administración de los terminales remotos anteriormente mencionados, es necesario el diseño un sistema capaz de interactuar con estos dispositivos, para permitir la extracción segura de la información capturada en los distintos puntos geográficos en donde se ubican los terminales remotos. Por este motivo, es esencial el planeamiento de un terminal maestro capaz de manejar múltiples conexiones simultaneas, además de guiar el protocolo de comunicación para que la información extraída de los terminales remotos siga una sintaxis correcta, para luego traducir esta información en parámetros que caracterizan la red eléctrica de baja tensión, y así poder almacenarlos en la base de datos del sistema de monitoreo.

En el transcurso del desarrollo del firmware del terminal remoto, se identificó el problema de la comunicación con el servidor por la incapacidad de definir una dirección física dentro de la red 3G. Por este motivo, se decidió por implementar el servidor TCP dentro del terminal maestro, a modo de permitir asignarle a este elemento de software la dirección IP estática del servidor en la nube.

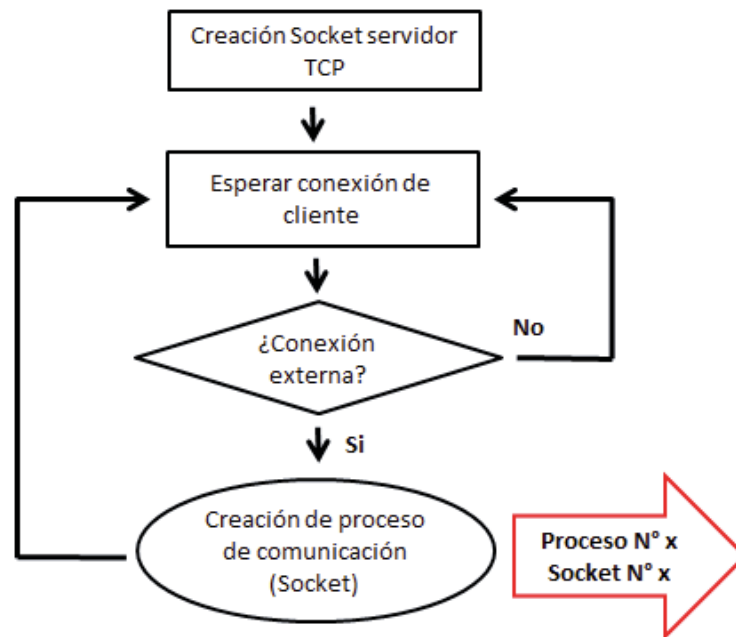


Figura 4-1 Algoritmo de comunicación por procesos múltiples

Este problema de comunicación de los terminales remotos se solucionó con la implementación del algoritmo presente en la figura 4-1, que permite la creación de un único servidor TCP, que genera un proceso nuevo cada vez que algún dispositivo se conecta a la dirección IP y al puerto determinado por el terminal maestro, lo que permite un manejo teórico de una cantidad infinita de conexiones TCP por parte del terminal maestro diseñado. A partir del proceso generado por este algoritmo, se inicia el protocolo estándar de comunicación expresado anteriormente, en donde se sigue una serie de pasos específicos para identificar el número identificador del terminal remoto que inició la comunicación. Luego de esto, se comprueba que el terminal remoto mantiene un comportamiento legítimo dentro del sistema, a través de la comprobación de la clave Diffie-Hellman creada a partir de un número privado que contiene cada terminal remoto y el terminal maestro, y para finalizar se inicia el proceso de consulta de las variables específicas que se desee incluir dentro de la base de datos del sistema. Cuando el terminal maestro obtiene todas las variables necesarias, se envía un mensaje de desconexión y se elimina el proceso generado para la comunicación. Todo este proceso es acompañado con la interacción por parte del terminal maestro y la base de datos PostgreSQL, ya que esta es el punto final de los parámetros capturados desde la red de baja tensión.

Dentro de las tablas presentes en la base de datos, la más importante para el desarrollo del terminal maestro es la encargada de definir las peticiones que se ejecutan en el protocolo de comunicación entre los terminales remotos y el terminal maestro, la cual define tres columnas específicas para el nombre de la tabla en donde se guardarán los parámetros, la cantidad de variables a pedir, el lugar de estas variables dentro de la memoria interna del terminal remoto, el número divisor para convertir las variables enteras a variables de punto flotante, y el tipo de algoritmo que se utilizará para tratar la información recibida. Estos algoritmos se dividen en tres categorías: los mensajes múltiples, en donde la respuesta de las peticiones es mayor que el largo máximo de un mensaje Modbus TCP, los mensajes simples, en donde el largo máximo del mensaje Modbus TCP incluye todas las variables pedidas por el terminal maestro, y el mensaje de almacenamiento de la energía, ya que la transformación de este parámetro difiere al tratamiento hecho por los dos tipos de mensajes mencionados.

Tabla 4-1 Tabla de peticiones

acción	nombre	cantidad	registro	divisor
leer	corriente	3	3	1000
leer	distorsion_armonica	6	220	1000
leer	voltaje_linealinea	3	9	10
leer	voltaje	3	6	10
leer	potencia_aparente	3	21	1000
leer	potencia_reactiva	3	18	1000
leer	potencia_activa	3	15	1000
leer	potencia_trifasica	3	12	1000
leermultiple	armonicos_voltaje	59	411,472,533	1000
leermultiple	armonicos_corriente	59	228,289,350	1000
leer	factor_potencia	4	24	1000
leerenergia	energia	2	30	10

Para la conformación de la petición de los parámetro capturados por el terminal remoto, se utilizó el estándar de comunicación Modbus TCP para conformar el paquete de información, que se caracteriza por definir el lugar en la memoria en donde se encuentra el primer valor a preguntar, seguido por la cantidad de registros que se desean. Por otra parte, en la tabla 4-1 se puede observar la columna encargada de definir la transformación de las variables enteras obtenidas a un valor de punto flotante. En el caso de las peticiones de contenido armónico, se tuvo que utilizar tres peticiones para completar las 59 peticiones, por lo que se guardaron las tres posiciones en la memoria en donde se efectúan estas peticiones, para luego extraer los parámetros y generar un solo envío hacia la base de datos. Si existe algún problema en el formato del mensaje Modbus recibido, o en algún otro paso del protocolo estándar de comunicación expresado anteriormente, el terminal maestro tiene la habilidad de cerrar el proceso dedicado a la comunicación con terminal remoto.

El protocolo estándar de comunicación en el lado del terminal maestro se inicia con la lectura de la base de datos, en donde se extraen todas las peticiones descritas correctamente, para luego ejecutar el envío de peticiones de los parámetros hacia el terminal maestro por medio del protocolo Modbus TCP, al existir una respuesta correcta por parte del terminal remoto, estos parámetros son extraídos del paquete recibido, para luego ser transformados de variables enteras a variables de punto flotante por medio del número divisor existente en la base de datos. Cuando se comprueba que la cantidad de parámetros eléctricos recibidos es acorde a las especificaciones en la base de datos, se procede a incluir las variables extraídas en un diccionario global, para luego insertar todas las variables capturadas en el transcurso del protocolo de comunicación en la base de datos, utilizando la herramienta SQLAlchemy. Al terminar este proceso, se envía un mensaje de desconexión hacia el terminal remoto, y se elimina el proceso ejecutado junto con el socket utilizado para la comunicación TCP.

A partir del desarrollo del terminal remoto, se observó la problemática de la calibración de los parámetros de corriente, potencia y energía capturados por el terminal remoto, puesto que la integración de las bobinas Rogowski hace necesaria la inclusión de un transformador de corriente de software para transformar el parámetro extraído en un valor correcto. Esta problemática se tuvo que corregir dentro del desarrollo del terminal maestro, ya que los parámetros extraídos y almacenados dentro del terminal remoto presentan la naturaleza de variables enteras, que junto a la utilización del transformador de corriente se traducen en parámetros eléctricos correctos. Para identificar el valor correcto del transformador de corriente se comparó el parámetro de corriente Modbus arrojado por el medidor PM835 junto con la medición de corriente arrojada por el multímetro de tenaza UNI-T modelo UT200A [15], que presenta un error de medición de 1.5% en el rango de 2 a 100 Amperes. A partir de esto, se capturaron mediciones de corriente entre 20 y 100 Amperes, y se procedió a identificar la relación entre el parámetro Modbus arrojado por el medidor PM835 y el multímetro UT200A, para identificar si los parámetros medidos seguían un patrón lineal, y si existía un valor de amplificación que los relacionará.

La utilización del multímetro de tenaza y las bobinas Rogowski permitieron ampliar el espectro de medición de corriente, debido que no es necesaria la conexión directa del instrumento a la red que se desea monitorear. Por este motivo, se tuvo que diseñar una bobina capaz de presentar en la medición un valor de corriente superior a los 100 Amperes, lo que se logró al diseñar un circuito simple alimentado por un Variac monofásico, una bobina, y para permitir una medición lineal se utilizó como carga una ampolla de filamento de 60 Watts.

Este proceso de calibración se debe realizar por cada terminal remoto que se implemente en la red de baja tensión, por lo que se tuvo que diseñar la estación de calibración tomando en cuenta todas las medidas de seguridad eléctrica, como la aislación de la bobina utilizada, la elección del espectro de medición para que no se produzcan pérdidas por calor en la bobina, y la ubicación de la bobina en un lugar seco y libre de ruido electromagnético. En la tabla 4-3 se puede observar la linealidad de la medición de corriente dentro del rango de 20 a 100 Amperes, que permite identificar una relación entre los valores de corriente entregados por el multímetro UT200A y la respuesta Modbus del medidor PM835.

Tabla 4-2 Calibración de parámetros de corriente

Multimetro UT200A	Respuesta Modbus
20 A	13
30 A	19
40 A	25
50 A	31
60 A	38
70 A	44
80 A	50
90 A	57
100 A	63

Esta forma de almacenar la corriente como una variable entera facilita al envío de variables a través del protocolo Modbus, lo que elimina la dependencia en el protocolo IEEE 754 [16] para la conversión de variables de punto flotante a una cadena hexadecimal, y permite la calibración remota a partir de la extracción de los parámetros eléctricos en el terminal maestro. Luego de que los parámetros son ingresados en la base de datos del sistema, no existen problemas en la naturaleza de las variables utilizadas, ya que su interpretación es posible a partir de variables de punto flotante o variables enteras. A partir del análisis de los valores de corriente medidos, se pudo observar que la relación entre la respuesta Modbus del medidor PM835 y el valor real de la corriente capturada a través del multímetro UT200A sigue una línea recta, que es observable en la figura 4-2, y que permitió la calibración correcta de los parámetros dentro de la memoria del terminal remoto

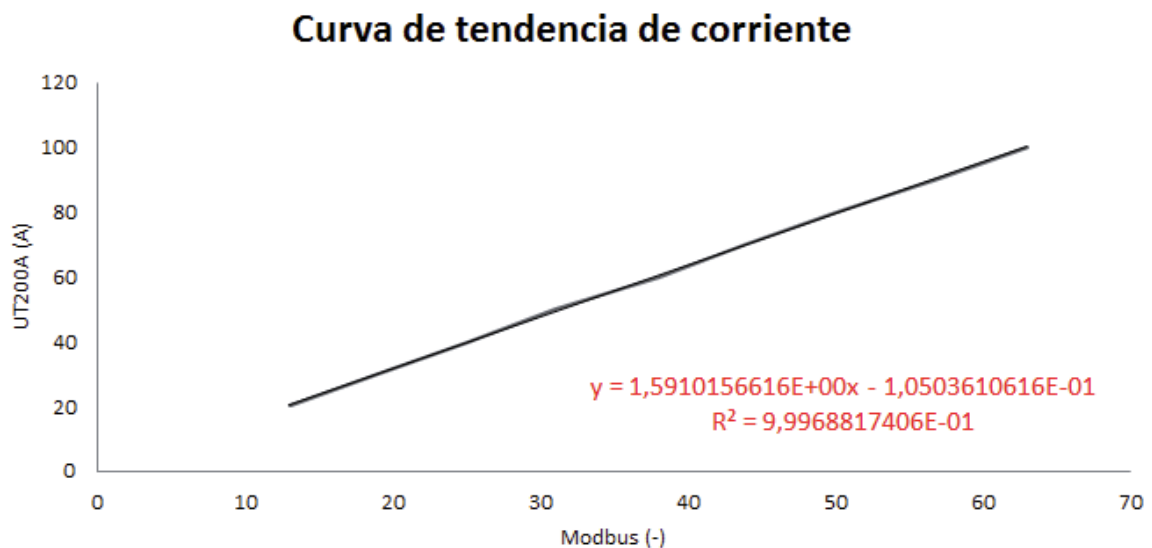


Figura 4-2 Gráfica relacional de corriente

Estos dos valores obtenidos por la calibración que caracteriza la ecuación de la recta, presente en la figura 4-2, se incluyeron dentro de la base de datos dedicada a almacenar los parámetros de calibración, y son utilizados para la transformación de la respuesta por parte del terminal remoto en los parámetros de corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, y energía. Este proceso de calibración está presente dentro del protocolo estándar de comunicación implementado en el terminal remoto, y se ejecuta automáticamente al identificar que el nombre de la tabla perteneciente a la respuesta del terminal remoto corresponde a alguno de los parámetros que se deben calibrar. Este proceso de calibración permitió que las variables eléctricas dependientes de la corriente capturadas por el sistema de monitoreo remoto presenten un error de medición menor al 5%, lo que asegura que la caracterización del estado de la red de baja tensión esté dentro de las expectativas de este proyecto.

4.1.2 Sistema de alarmas

El sistema de alarmas diseñado, es el encargado de adquirir los paquetes de información generados por el proceso de detección de comportamiento anómalo, presente en el funcionamiento del firmware del terminal remoto, y que sigue una estructura de cuatro bytes por el método implementado para reducir el uso del ancho de banda en este proceso de comunicación.

Al mantener un funcionamiento similar al diseño del terminal maestro, se decidió por utilizar el algoritmo de comunicación por procesos múltiples para la conformación del sistema de alarmas, pero se modificó la ejecución del protocolo de comunicación para adaptarse a la sintaxis presente en el paquete de alarmas generado por el terminal remoto. A partir de esto, se diseñó el proceso de captura de alarmas como un receptor universal de paquetes de cuatro bytes, en donde se rechaza la comunicación automáticamente si el largo del paquete recibido no es de cuatro bytes. Cuando existe un paquete correcto, se extrae el primer byte que contiene el número identificador del terminal maestro, se transforman los tres bytes siguientes para extraer las dieciocho variables lógicas del paquete de alarmas, se procede a insertar estas variables en la base de datos y se cierra el proceso generado por el algoritmo diseñado, a modo de terminar la comunicación.

4.1.3 Base de datos

Para la comunicación entre los elementos de software presentes en el servidor y la base de datos, se decidió por utilizar la herramienta de software SQLAlchemy, que permite la integración de bases de datos dentro del desarrollo en el lenguaje Python. Esta herramienta se ajusta al tipo de bases de datos utilizada, además de permitir la creación automática de las tablas utilizadas cuando se ejecuta el código diseñado, lo que facilita el cambio de bases de datos en el futuro, y además estandariza el uso de las bases de datos dentro del desarrollo de software. A partir del total de variables capaces de capturar por el terminal remoto, se establecieron las tablas de esta base de datos, la ubicación geográfica de este, los parámetros de calibración de los medidores de variables eléctricas utilizados, el establecimiento de los tiempos de espera dentro del firmware, además de las tablas que interactúan con la interfaz visual, tales como la administración de usuarios y los parámetros técnicos del transformador medido.

La conformación de estas tablas en el formato utilizado por el framework SQLAlchemy está incluido en el apéndice B de este documento, a modo de que sea comprensible la utilización de clases en vez de peticiones a la base de datos. Para la implementación del framework SQLAlchemy dentro del desarrollo de software del terminal maestro y la interfaz visual, se tuvieron que definir todas las tablas utilizadas dentro de la base de datos en el formato de clases, ya que la característica principal en el trabajo junto al framework SQLAlchemy es la eliminación de las consultas directas, para basar todo el desarrollo a base de las clases características de cada una de las tablas presentes en la base de datos. Siguiendo con este concepto, se tuvo que declarar todas las tablas utilizadas en formato de clases, para luego ser utilizadas en el proceso de publicación de los parámetros capturados desde el terminal remoto.

Tabla 4-3 Tablas de parametros electricos

Nombre de la tabla	Cantidad de columnas
corriente	6
distorsion_armonica	9
voltaje_linealinea	6
voltaje	6
potencia_aparente	6
potencia_reactiva	6
potencia_activa	6
potencia_trifasica	6
armonicos_voltaje	180
armonicos_corriente	180
factor_potencia	7
energia	5
calibracion	3
peticiones	5

Este proceso se dividió en dos fases para facilitar su implementación, en primer lugar, se identificaron todas las tablas necesarias para caracterizar los parámetros que es capaz de capturar el terminal remoto, que se pueden observar en la tabla 4-3, y en segundo lugar, se diseñaron las clases que caracterizan cada una de estas tablas dentro de la base de datos utilizada. Esto permitió traducir las tablas necesarias al formato de clase utilizado en el lenguaje de programación Python, para permitir la implementación del framework SQLAlchemy de forma transversal a todos los elementos de software que son ejecutados dentro del servidor del sistema.

La definición de la base de datos del servidor fue utilizada de manera conjunta entre los elementos que lo conforman, a partir de la utilización transversal de la herramienta SQLAlchemy en el desarrollo de software. Otro beneficio entregado por la implementación de esta herramienta de software fue la capacidad de generar funciones dentro de la declaración de las tablas dentro de la base de datos, que permitieron definir el formato en la extracción de información incluida dentro de cada tabla. Esta habilidad se observa en la figura 4-3.

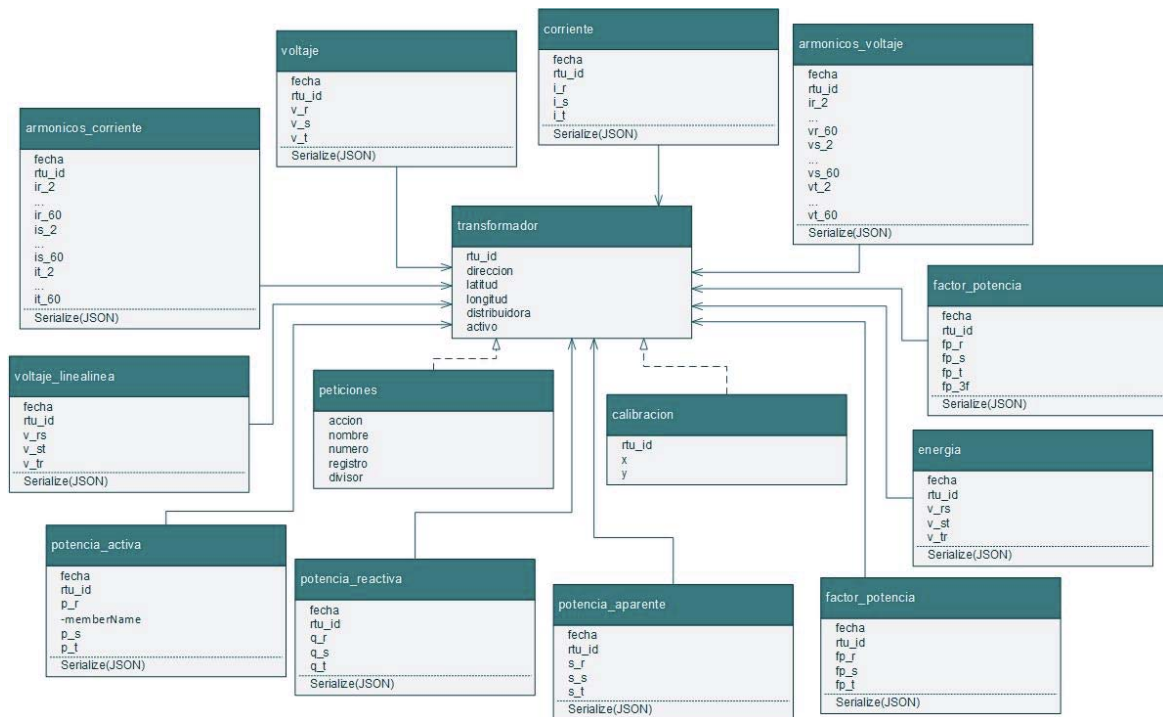


Figura 4-3 Diagrama de tablas incluidas en la base de datos

En el diagrama anterior se observan las tablas utilizadas para la administración de los parámetros eléctricos capturados por el terminal remoto, junto con los elementos que permiten la relación de la información obtenida con los elementos físicos presentes en la red de baja tensión, que son almacenados en la tabla *transformador*. También se incluyó la función *Serialize()* dentro de la definición de las tablas que almacenan parámetros eléctricos, a modo de permitir la generación automática de respuestas JSON para facilitar la visualización dinámica de los mismos. Junto con esto, se incluyeron las tablas que almacenan las peticiones a ejecutar en el protocolo de comunicación y la calibración de los terminales remotos, que no utilizan el cambio de formato en la respuesta de la base de datos.

4.1.4 Servidor Web

Al elegir el lenguaje de programación Python para el diseño transversal de las herramientas de software del sistema, se tuvo que investigar la forma adecuada para el diseño de la interfaz visual a través de este lenguaje, lo que nativamente no está presente dentro de este lenguaje de programación. A partir de esto, se decidió por analizar las dos mayores alternativas para el desarrollo visual dentro del lenguaje Python, las que son las aplicaciones visuales de escritorio y las aplicaciones Web. Al analizar la alternativa del desarrollo de una aplicación de escritorio, se encontró la problemática de la nula existencia de la capacidad de desarrollo multiplataforma, lo que limita la capacidad de diseño de software, además de crear la necesidad del desarrollo de aplicaciones específicas para cada sistema operativo de escritorio presente en el mercado.

Por este motivo, se decidió por la creación de una interfaz visual como aplicación Web, lo que permite el uso transversal de la aplicación en distintas plataformas, sin importar el sistema operativo que utilice el usuario final. Para permitir el desarrollo de la aplicación Web dentro del lenguaje Python, se compararon las dos grandes herramientas de software específicas para en esta área, las cuales son Django [17] y Flask. Estas dos herramientas presentan varias características en común, como su naturaleza de código abierto, la capacidad de trabajo con bases de datos, y la habilidad para trabajar con plantillas HTML, pero difieren en tres puntos importantes para este proyecto, los que permitieron elegir a Flask como la herramienta de software a utilizar para la creación de la interfaz visual. Estas características son la rapidez en las respuestas JSON [18], la facilidad de utilización e implementación, y la capacidad de selección de los módulos específicos que se deseen implementar en la aplicación final. El factor más relevante en la selección del framework a utilizar fue la velocidad [19] de la creación de respuestas JSON, ya que esto permitirá la actualización en tiempo real de la información presente en la interfaz visual, a partir de la creación de respuestas JSON con los parámetros almacenados en la base de datos.

Con este análisis se pudo determinar que Flask será el componente principal en el funcionamiento de la interfaz visual, además de ser complementado con el framework SQLAlchemy para el manejo de la base de datos del sistema. Estos dos entornos de desarrollo de software permiten la visualización de los parámetros eléctricos capturados de la red de baja tensión, presentándolos como una página Web capaz de ser visualizada transversalmente desde cualquier sistema electrónico que permita la navegación por internet, sin importar el sistema operativo o las características de hardware que presente cada sistema.

Al elegir el framework Flask para la creación de la interfaz visual del sistema, se tuvo que adaptar el desarrollo de software para trabajar específicamente a través de esta herramienta, ya que el comportamiento de Flask se basa en dos elementos interconectados entre sí, los cuales permiten la creación de un servidor Web, la manipulación de la información almacenada en la base de datos y el diseño de plantillas en formato HTML que permiten la visualización final de esta información. Por este motivo, se tuvo que definir la ruta de cada página Web perteneciente a la interfaz visual diseñada, además de explicitar que variables se extraerán de la base de datos, para luego diseñar la plantilla HTML específica para cada ruta definida. Este proceso es transversal al desarrollo de la interfaz visual, debido a que cada página Web incluida en el sistema tiene una ruta y una plantilla asignada a ella.

En la tabla 4-4 se muestran todas las rutas de acceso presentes en el servidor Web que genera el framework Flask, junto con los privilegios necesarios para la visualización de cada una de las páginas Web incluidas en el diseño de la interfaz visual. También se puede observar un comportamiento dinámico en la definición de las rutas de acceso en el caso del panel de control, la configuración de los tiempos de espera de los terminales remotos, y la visualización de los parámetros eléctricos, lo que permite la transformación de la página Web visualizada dependiendo de la variable ingresada dentro de la ruta de acceso. Esta característica del framework Flask permitió el diseño de una única página dedicada a la visualización de los parámetros eléctricos, los cuales son extraídos desde la base de datos a partir del número identificador del terminal remoto incluido en la ruta de acceso.

Tabla 4-4 Rutas de acceso del servidor Web

Nombre de página	Ruta	Privilegios
Página principal	/	Requiere identificación de usuario
Historial de alarmas	/alarmas	Requiere privilegios de administrador
Panel de control	/cpanel/(Página)	Requiere identificación de usuario
Transformadores del sistema	/id	Requiere identificación de usuario
Parámetros históricos	/id/(RTU ID)	Requiere identificación de usuario
Tiempos de espera de RTU	/timers/(RTU ID)	Página pública
Inicio de sesión de usuario	/login	Página pública
Cierre de sesión de usuario	/logout	Página pública
Identificación de usuario	/login_check	Página pública

Cuando un usuario ingresa a alguna de las rutas de acceso presentadas anteriormente, la aplicación diseñada ejecuta un algoritmo específico de extracción y manipulación de los parámetros requeridos, para luego presentar esta información a través de las plantillas HTML, por este motivo se decidió por definir en primera instancia las rutas de acceso, para luego definir el aspecto visual en relación a la entrega de información. La implementación de la extensión SQLAlchemy dentro del funcionamiento del framework Flask le entregó a la interfaz visual la capacidad de leer la información presente en la base de datos del sistema. Este proceso de lectura fue dividido en dos métodos, a partir de la necesidad de diferenciar la captura de información para la presentación visual de elementos que varían en el tiempo, de elementos constantes, como los nombres de usuario y la posición geográfica de los terminales remotos, ya que la inclusión de estos parámetros dentro de las plantillas HTML difieren entre sí.

En el caso de la visualización de elementos constantes en el tiempo, como las variables que caracterizan a los transformadores que monitorea este sistema, o el nombre y la empresa del usuario que utiliza la interfaz visual, se utilizó la función *render_template* presente en el framework Flask, que ingresa las variables directamente a la plantilla HTML y entrega la página Web completa al usuario final en la ruta de acceso determinada. Este método permite ingresar información a las plantillas HTML, pero genera un problema al momento de incluir información variable en el tiempo, por lo que se tuvo que implementar el uso de las respuestas JSON en el diseño de las plantillas HTML para permitir la generación de elementos visuales capaces de actualizar la información que entregan.

La implementación de las respuestas JSON se hizo posible a través de la definición de rutas de acceso específicas para este propósito, en donde se ejecuta un algoritmo diseñado para transformar los parámetros eléctricos extraídos desde la base de datos en una respuesta JSON entregada en formato de texto plano. A partir de esto, se incluyeron en las plantillas HTML los códigos en lenguaje Javascript que generan las peticiones e interpretan las respuestas JSON en intervalos de tiempo específicos, lo que permitió la generación de elementos visuales dinámicos, que entregan la información del funcionamiento de la red eléctrica en tiempo real a través de la interfaz Web. Estos elementos visuales dinámicos contemplan la visualización total de la última

comunicación entre el terminal remoto seleccionado y el terminal maestro, además de la representación histórica de los parámetros eléctricos por separado, y un gráfico en el dominio de la frecuencia para representar el contenido armónico de tensión y corriente.

4.2 Configuración final

Al terminar el diseño del terminal maestro, el sistema de alarmas y el servidor Web, se incluyó el código fuente de cada uno de estos elementos de software dentro de la plataforma Amazon AWS para asegurar que su ejecución sea continua y no presente problemas de desconexión, junto con esto, se tuvo que configurar la ejecución del servidor Web dentro del servidor en la nube, a través de la instalación de un servidor Apache configurado con un módulo WSGI, que dirige las peticiones Web hacia las rutas de acceso definidas por el framework Flask. Con esto se dio por finalizado el desarrollo de software de los elementos que conforman el servidor del sistema, y se dio paso a diseñar las plantillas HTML para permitir la presentación gráfica de los parámetros eléctricos capturados por el sistema de monitoreo.

5 Visualización del estado de la red eléctrica

Uno de los pilares fundamentales en el diseño de los sistemas de monitoreo es creación de la interfaz visual, ya que esta es la herramienta encargada de presentar al usuario final los parámetros capturados por el sistema. A partir de este postulado, se desarrolló una herramienta visual multiplataforma, intuitiva y fácil de utilizar, con la capacidad de entregar todos los parámetros eléctricos que caracterizan a la red de baja tensión de manera ordenada y en tiempo real. Este desarrollo fue posible a partir de la integración de la base de datos del sistema, la cual permitió almacenar los parámetros eléctricos históricos capturados por los terminales remotos.

5.1 Implementación del sistema

Cuando un usuario ingresa a alguna de las rutas de acceso definidas en el servidor Web, la aplicación diseñada ejecuta un algoritmo específico de extracción y manipulación de los parámetros requeridos desde la base de datos, para luego presentar esta información a través de las plantillas HTML, por este motivo se decidió por definir en primera instancia las rutas de acceso, para luego definir el aspecto visual en relación a la entrega de información. El diseño de las plantillas HTML sigue un estándar definido por el framework Django, que fue mantenido en la creación del framework Flask, y se caracteriza por la capacidad de incluir variables dentro del desarrollo de software en la visualización Web, además de entregar herramientas básicas de programación dentro de las plantillas. Este concepto de programación de plantillas HTML permite la adaptación de los elementos visuales dependiendo de la naturaleza de la variable que se incluye dentro del código HTML asignado a la ruta de acceso definida. A partir de esta cualidad en el diseño Web, se decidió implementar la sintaxis para la inclusión de datos del framework Flask a una plantilla diseñada específicamente para plataformas de administración, lo que permitió diseñar las páginas Web que incluye la interfaz visual a partir de las especificaciones dispuestas en la definición de las rutas de acceso. La plantilla HTML elegida incluye la capacidad de implementar gráficos temporales y mapas dentro del estándar HTML5, además de la inclusión de la biblioteca JQuery para la programación en lenguaje Javascript. Este estándar para la creación de elementos visuales en las plantillas HTML fue implementado en la totalidad del diseño de las páginas Web que contiene la interfaz visual del sistema de monitoreo.

Al momento de ingresar a la dirección IP del servidor Web, la plantilla diseñada para esta ruta le entrega al usuario una pantalla de identificación, que se observa en la figura 5-1. Esta plantilla fue diseñada a modo de intermediario entre el servidor Web y la plataforma visual, ya que al ingresar un nombre de usuario y una contraseña, estos valores son manipulados por el software desarrollado bajo el framework Flask, y si la identificación del usuario a partir de la información almacenada en la base de datos es correcta, se procede a presentarle al cliente del sistema la pantalla principal del sistema de monitoreo remoto.

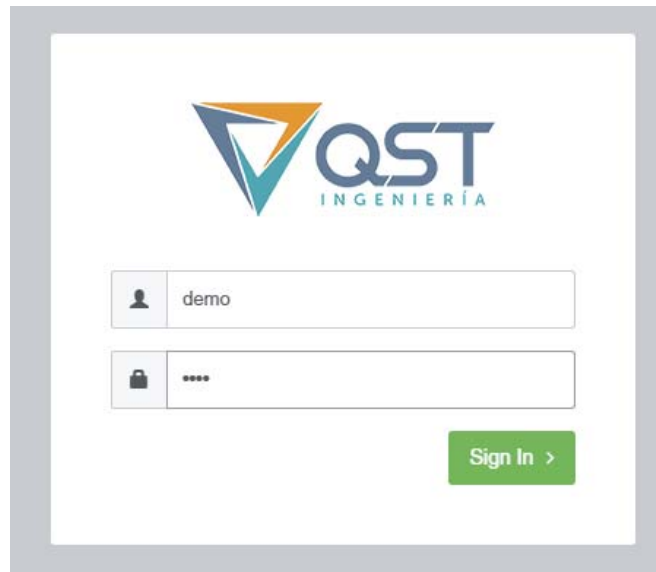


Figura 5-1 Página de identificación de usuario

La página principal del sistema diseñado se puede observar en la figura 5-2, que le entrega al cliente del sistema un resumen gráfico del comportamiento de la red eléctrica de baja tensión a partir de un mapa geográfico con indicadores visuales. Si un indicador se observa de color verde, significa que la comunicación con el terminal remoto ubicado en ese sector geográfico es correcta, y si el indicador del mapa es de color rojo, significa que la última iteración del sistema desde esa ubicación geográfica fue ejecutada hace más de media hora, lo que significa que el terminal remoto sufrió algún problema en su funcionamiento, o que la red eléctrica presenta problemas en ese lugar específico. Junto con el indicador presente en este mapa, se pueden observar los parámetros eléctricos más relevantes de manera automática, que son la tensión nominal de línea, la corriente nominal y el factor de potencia. También se incluye un enlace para ingresar a la ruta de visualización de los parámetros eléctricos capturados desde ese terminal remoto. Esta disposición de elementos visuales, junto con la presencia del menú contextual presente a la izquierda del mapa geográfico, le entrega al usuario final la capacidad de ingresar a todas las rutas de acceso presentes en el sistema de forma rápida, las cuales son la página dedicada a la entrega visual de los parámetros eléctricos del terminal remoto seleccionado, la plataforma que presenta las alarmas generadas por el sistema, y la herramienta de administración del sistema, que solo se incluye en el menú contextual si el usuario identificado es parte de los administradores del sistema de monitoreo.

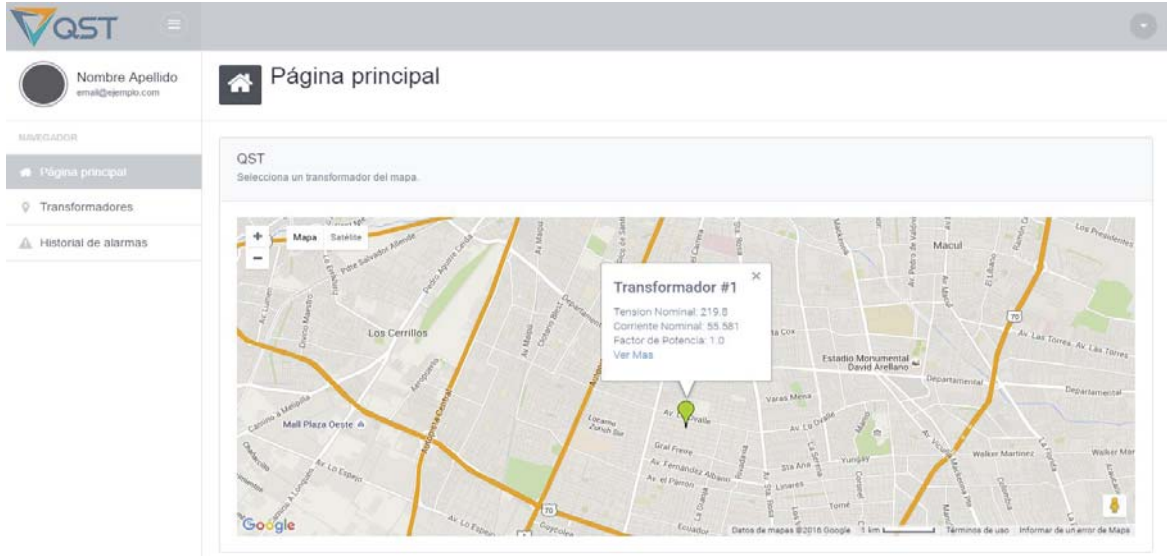


Figura 5-2 Página principal de la interfaz visual

En la figura 5-3 se puede observar la representación de la última iteración entre la comunicación del terminal remoto con el terminal maestro, en donde se entregan todos los parámetros eléctricos capturados en esa iteración, caracterizados temporalmente por su estampa de tiempo. Esta plantilla HTML presenta en primera instancia todos los parámetros eléctricos capturados en formato de texto plano, a modo de permitir visualizar rápidamente el comportamiento temporal de la red de baja tensión con la información presentada. Luego de esta visualización, se entregan los elementos visuales en forma de gráficos, que fueron generados a partir de las respuestas JSON que ejecuta el servidor Web de la información almacenada en la base de datos.

Valores Instantaneos			
Último valor recibido: 2016-05-23 15:12:47			
<ul style="list-style-type: none"> Tensión <ul style="list-style-type: none"> R: 223.3 V S: 223.4 V T: 222.9 V Tensión entre líneas <ul style="list-style-type: none"> R-S: 0 V S-T: 0 V T-R: 0 V Distorsión armonica de Tensión (THD) <ul style="list-style-type: none"> R: 3.43 S: 3.43 T: 3.35 	<ul style="list-style-type: none"> Corriente <ul style="list-style-type: none"> R: 42.852 A S: 42.852 A T: 42.852 A Distorsión armonica de Corriente (THD) <ul style="list-style-type: none"> R: 9.51 S: 10.47 T: 10.42 	<ul style="list-style-type: none"> Potencia Activa (P) <ul style="list-style-type: none"> R: 9.441 KW S: 9.441 KW T: 9.441 KW Potencia Reactiva (Q) <ul style="list-style-type: none"> R: 0 KVar S: 0 KVar T: 0 KVar Potencia Aparente (S) <ul style="list-style-type: none"> R: 9.441 KVA S: 9.441 KVA T: 9.441 KVA 	<ul style="list-style-type: none"> Factor de Potencia <ul style="list-style-type: none"> R: 1 S: 1 T: 1 Energia <ul style="list-style-type: none"> Total: 569.5 KWh

Figura 5-3 Página de visualización de parámetros eléctricos

5 Visualización del estado de la red eléctrica

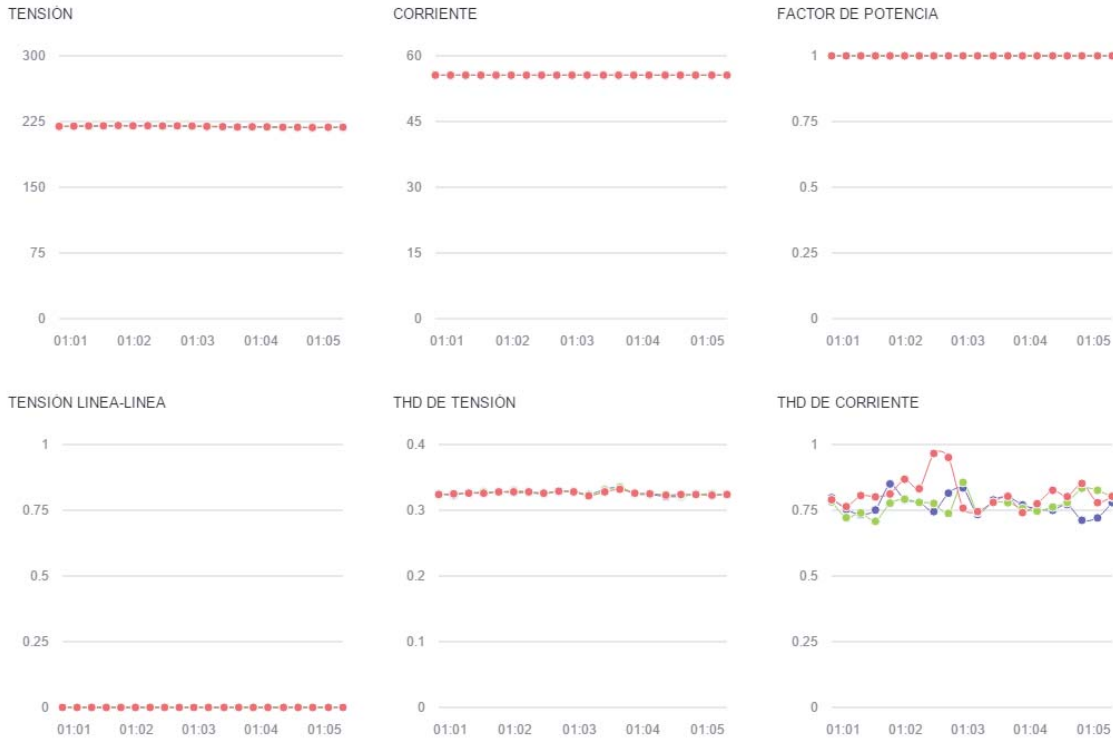


Figura 5-4 Representación de parámetros eléctricos de forma grafica

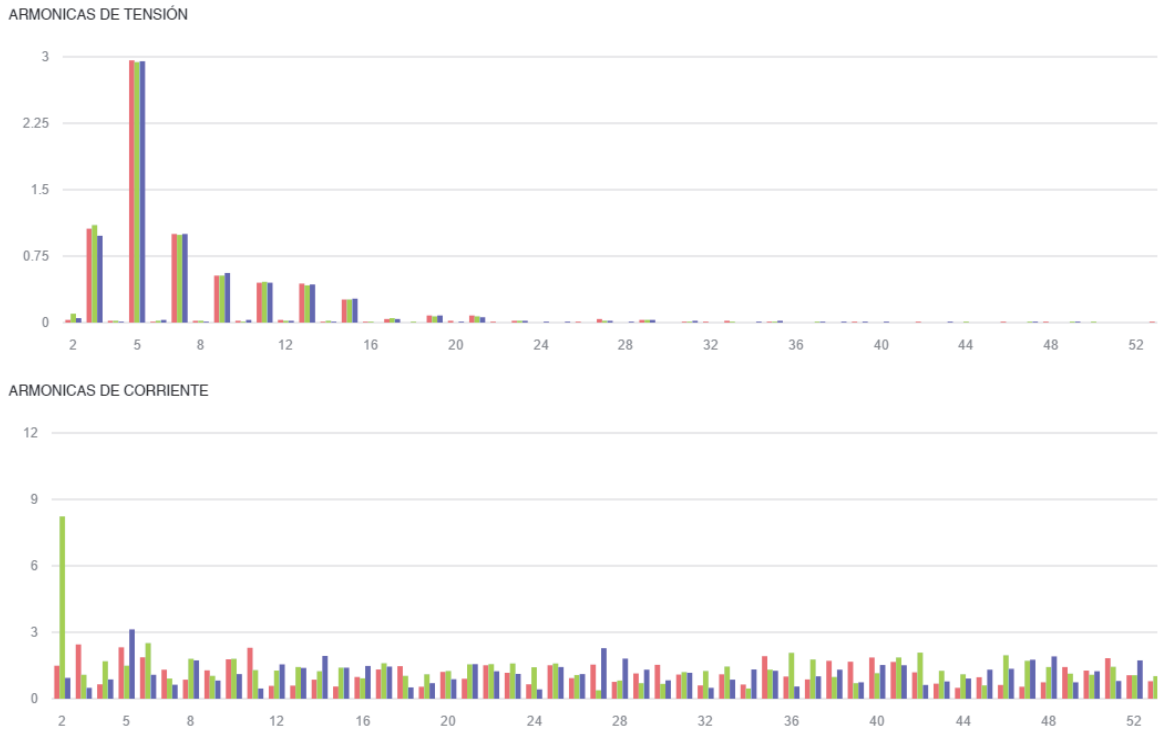


Figura 5-5 Representación de contenido armónico en el dominio de la frecuencia

En las figuras 5-4 y 5-5 se pueden observar estos elementos visuales, que entregan la información de veinte iteraciones del sistema de monitoreo remoto, a modo de representar el comportamiento de los parámetros eléctricos que caracterizan a la red de baja tensión a través del tiempo. En este método de visualización, se tuvo que diferenciar la generación de gráficos temporales de los gráficos en el dominio de la frecuencia, ya que la representación del contenido armónico de tensión y corriente requirieron la utilización de gráficos de barras, a modo de simular la visualización de un análisis de la transformada de Fourier. Por este motivo, los gráficos temporales presentan en el eje X la hora en donde fue realizada la toma de muestras, y en el eje Y la amplitud del parámetro eléctrico presentado, versus la representación en el dominio de la frecuencia, que en su eje X presenta el orden de la armónica de tensión o corriente, y en el eje Y se entrega la amplitud normalizada, con respecto a la armónica de primer orden.

El último elemento presente en el menú contextual de la interfaz diseñada corresponde al sistema de alarmas, que entrega la visualización de los eventos importantes identificados por los terminales remotos. Esta página se observa en la figura 5-6, donde se incluye la estampa de tiempo en donde se generó la alarma, el número identificador del terminal remoto que envió este mensaje, la información en bruto de las variables lógicas enviadas en la alarma, y una breve descripción generada a partir de la interpretación de este mensaje.

Alarmas del sistema

Administrador de alarmas			
Fecha	Unidad	Estado	Descripción
2016-04-28 00:57:58	1	000001000000100000	Problemas de suministro (Factor de potencia mayor a 0.98) Ver detalle
2016-04-28 00:57:28	1	101010000000100000	Iniciando unidad remota Ver detalle
2016-04-25 22:12:01	1	000001000000100000	Problemas de suministro (Factor de potencia mayor a 0.98) Ver detalle
2016-04-25 22:11:41	1	101001000000100000	Iniciando unidad remota Ver detalle
2016-04-04 21:39:44	1	000000000000000000	Funcionamiento correcto Ver detalle
2016-04-01 14:13:06	1	000101000000100000	Problemas de suministro (Corriente bajo 10 A) (Factor de potencia mayor a 0.98) Ver detalle
2016-04-01 14:12:46	1	101110000000100000	Iniciando unidad remota Ver detalle
2016-03-31 22:39:41	1	000001000000100000	Problemas de suministro (Factor de potencia mayor a 0.98) Ver detalle
2016-03-31 22:39:11	1	101010000000100000	Iniciando unidad remota Ver detalle
2016-03-31 21:54:33	1	000001000000100000	Problemas de suministro (Factor de potencia mayor a 0.98) Ver detalle
2016-03-31 21:54:03	1	101110000011111110	Iniciando unidad remota Ver detalle
2016-03-31 21:49:20	1	000001000000100000	Problemas de suministro (Factor de potencia mayor a 0.98) Ver detalle
2016-03-31 21:48:49	1	101010000000100000	Iniciando unidad remota Ver detalle
2016-03-31 21:46:34	1	000001000000100000	Problemas de suministro (Factor de potencia mayor a 0.98) Ver detalle

Figura 5-6 Plataforma de administración de alarmas

Esta plataforma visual se diseñó a partir de los elementos que entrega el servidor Web, que utiliza las herramientas Flask y SQLAlchemy para la representación de la información capturada de modo visual, a partir de la utilización de las plantillas HTML que están ligadas a cada ruta de acceso definidas dentro del servidor Web.

La generación de elementos visuales se puede observar en el apéndice B, en donde se incluye el desarrollo de software dedicado específicamente a la generación de elementos visuales, a partir de la interpretación de la información capturada por el sistema de monitoreo remoto.

5.2 Configuración final

Al finalizar con la programación y el diseño de las plantillas HTML, se procedió a incluir los archivos dentro del código fuente del servidor Web presente en la plataforma Amazon AWS. Con esto se dio por finalizado el desarrollo del prototipo de sistema de monitoreo remoto para las redes de baja tensión, y se procedió a realizar pruebas de desempeño del sistema en su totalidad, junto con el análisis de los puntos críticos en donde la existencia de fallas puede poner en riesgo la estabilidad del proyecto desarrollado.

6 Pruebas de desempeño

El sistema de monitoreo remoto diseñado no pudo ser implementado en el terreno urbano, dado que la formulación del proyecto como un servicio de monitoreo presenta la problemática de la entrada en el mercado del mismo, para luego cumplir con todos los requisitos legales, económicos y logísticos para su puesta en marcha. A partir de esta problemática, se decidió por realizar las pruebas de desempeño a partir del prototipo diseñado en este estudio, a modo de comprender como los elementos que conforman el sistema interactúan entre sí, y como esto genera la información necesaria para la visualización gráfica para comprender el comportamiento de la red eléctrica de baja tensión.

6.1 Análisis de comunicación entre componentes

Este estudio de la comunicación entre los componentes que conforman el sistema de monitoreo se llevó a cabo desde el inicio de la captura de parámetros eléctricos, a partir de la comunicación entre el medidor de variables eléctricas y la placa Raspberry Pi, para luego estudiar la comunicación a través de la red 3G con el terminal maestro, finalizando con la entrega de la información visual desde la plataforma Web, a partir de la generación de las respuestas JSON desde el servidor. Con esto, se pudieron observar los tiempos aproximados entre cada comunicación, junto con la estabilidad presente en cada uno de estos procesos de envío de información. Al definir un tiempo de iteración de diez minutos entre cada toma de muestras, se entregó un gran espacio temporal para que todos los componentes internos del sistema de monitoreo remoto generaran la comunicación interna de los parámetros eléctricos.

El punto inicial en el funcionamiento del terminal remoto se encarga de la comunicación serial entre el medidor PM835 y la placa Raspberry Pi, que se desarrolla bajo el protocolo Modbus TCP y que conlleva la ejecución de peticiones de lectura de la memoria interna del medidor de variables eléctricas. Este proceso presentado anteriormente, permite la extracción en bruto de los parámetros eléctricos que caracterizan temporalmente a la red de baja tensión, en el punto geográfico específico en donde se implementó el terminal remoto. Al analizar esta comunicación, se observó que el tiempo entre el inicio del envío de peticiones hasta la captura de todas las respuestas entregó un valor promedio de 2,5 segundos, en base a la ejecución de catorce peticiones de lectura de la memoria interna del medidor de variables eléctricas, que contiene 600 valores enteros. Por este motivo, se tuvo que tomar en consideración los tiempos de iteración

entre cada proceso interno en el firmware del terminal remoto, ya que la posibilidad de ejecutar una lectura a la memoria por parte de algún proceso en casos en donde la memoria todavía no fuera creada genera errores de ejecución del firmware. Luego de la captura de la memoria interna, el firmware procede al filtraje y al análisis de comportamiento anómalo, para luego entregar la memoria final del terminal remoto. Este proceso se llevó a cabo en un tiempo promedio de 4 segundos, a consecuencia de la capacidad de computo presente en la placa Raspberry Pi, y en la utilización del lenguaje de programación de alto nivel Python para la manipulación de información en formato hexadecimal. A consecuencia de estos tiempos de ejecución, se decidió por definir un tiempo de iteración para la generación de la memoria interna de 1 minuto, a modo de entregarle a las herramientas de software diseñadas un intervalo de tiempo considerablemente amplio para la ejecución de sus procesos.

Para la comunicación entre los terminales remotos y el terminal maestro, a través de la utilización de la red móvil 3G, se observó un tiempo aproximado para la ejecución del protocolo estándar de comunicación de 3 segundos. Este intervalo de tiempo es afectado por el nivel de señal presente en el lugar geográfico en donde se ubique el terminal remoto, por lo que se debe realizar esta prueba de comunicación cada vez que se implemente un terminal remoto en la red de baja tensión, para comprender el retardo presentado a partir de la presencia de este intervalo temporal de comunicación. Al momento de obtener los parámetros en el terminal remoto, su comunicación dentro del servidor del sistema presenta espacios temporales ínfimos, debido a que sus elementos de software están presentes dentro de la misma plataforma Amazon AWS. Por este motivo, se analizó solo la generación de respuestas JSON ejecutadas desde el servidor, y entregadas al usuario final del sistema a través de la interfaz Web diseñada. Este proceso se analizó en primera instancia con la ejecución del servidor Web de forma remota, para luego analizar los intervalos de tiempo con el servidor Web en ejecución desde la plataforma Amazon AWS. Este factor produjo un cambio considerable en estos intervalos de tiempo, ya que como fue mencionado anteriormente, al estar la base de datos y el servidor Web dentro de la misma instancia, la comunicación entre estos dos elementos disminuye notablemente.

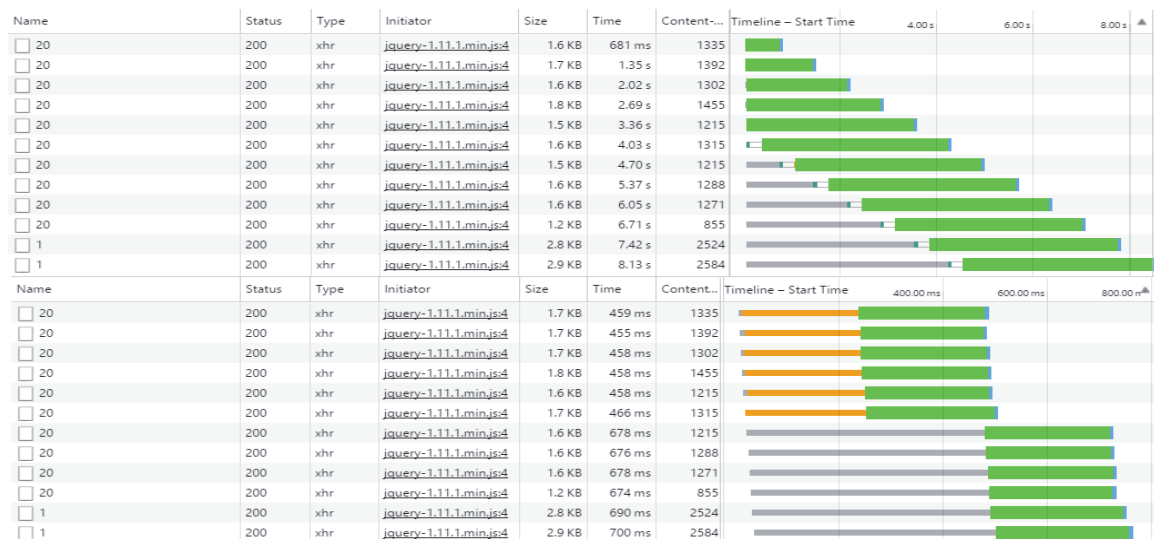


Figura 6-1 Tiempos de ejecución de respuestas JSON

En la figura 6-1 se puede observar este cambio considerable entre los intervalos temporales generados por las respuestas JSON. En el sector superior de la imagen se observan los intervalos de tiempo generados a partir de la ejecución del servidor Web de forma remota, y ejecución de la base de datos desde la plataforma Amazon AWS. Esto entregó un tiempo promedio de 8,1 segundos para el refresco automático de la información, que contrasta con los 700 milisegundos observados con la ejecución del servidor Web en conjunto con la base de datos en la plataforma Amazon AWS.

Tabla 6-1 Tiempos de retardo generados en la comunicación interna

Proceso	Intervalo temporal (s)
Lectura de memoria Modbus TCP	2,5
Filtraje de variables capturadas	2
Comunicación al Terminal Maestro	3
Generación de respuestas JSON	0,7
Total	8,2

A partir de este análisis, se pudo obtener un valor temporal aproximado de 8 segundos entre que los parámetros eléctricos son leídos desde la red eléctrica y su presentación gráfica. Como cada proceso de comunicación presenta tiempos definidos para su iteración, este espacio temporal no es observable por el cliente final del sistema de monitoreo, puesto que este delta se observa dentro de cada iteración, y es acarreado normalmente entre cada proceso de visualización de los parámetros eléctricos. En palabras simples, dentro de cada punto temporal visualizado dentro de los gráficos presentes en la interfaz visual, se observará el tiempo de diez minutos para la definición de tiempo real en el sistema, pero cada punto estará retardado en 8,2 segundos. Se mantendrá el concepto de tiempo real, pero se retardarán todos los puntos medidos, lo que no genera problemas ya que las estampas de tiempo capturadas consideran el momento de la toma de muestras, no en el retardo producido por la manipulación de información.

6.2 Pruebas de estabilidad

Dentro de los elementos que atentan contra la estabilidad del sistema completo, ya se presentaron los análisis de la comunicación de los parámetros eléctricos a través de todo el sistema de monitoreo, teniendo en cuenta que la existencia de fallos en la comunicación en base a la utilización de la red móvil 3G afectaría la estabilidad del sistema de monitoreo remoto, al imposibilitar la captura de los parámetros eléctricos de forma remota. Por este motivo, se decidió por indicar que dentro de los estudios necesarios para realizar la implementación del sistema, se debe llevar a cabo un análisis de conectividad desde el punto geográfico en donde se posicionará el terminal remoto en la red eléctrica de baja tensión.

Al observar el funcionamiento del terminal remoto, se pudo determinar que la elección de la placa Raspberry Pi fue una ayuda considerable al momento de la extracción y manipulación de estos parámetros en bruto, a partir de la conectividad serial y los elementos de software diseñados específicamente para permitir esta comunicación de forma eficiente y rápida. Pese a

esto, todo el proceso realizado por el firmware diseñado presenta un tiempo de ejecución relativamente grande, en comparación a la ejecución de este mismo proceso con otros lenguajes de programación como C++ o Java. Este retardo producido por la manipulación de información se tuvo que afrontar, para permitir el desarrollo de un firmware de procesos múltiples, lo que no pudo haber sido desarrollado nativamente a partir de la utilización del lenguaje de programación C++. Con esto, se pudo observar que el firmware diseñado cumple con las expectativas propuestas para este proyecto, y gracias a la utilización del sistema operativo basado en Linux se pudo asegurar una estabilidad relativa dentro del desarrollo de software. Un factor clave para la estabilidad del terminal remoto es la posibilidad de manipulación física del dispositivo, pero este punto no puede ser afrontado con anterioridad, ya que estos eventos se producen de forma errática y es imposible predecirlos.

A partir de la elección de un servidor único para el sistema, que su ejecución este implementada bajo la plataforma Amazon AWS, se pudo asegurar que la estabilidad del sistema sea constante en el tiempo, en base de las protecciones de seguridad que entrega esta plataforma, junto a la distribución del trabajo del servidor en subsistemas de software, como lo son el terminal maestro, el sistema de alarmas y el servidor Web. Al elegir que estos tres componentes de software funcionaran de manera independiente, se eliminó la posibilidad de que un fallo producido por uno de estos elementos pusiera en peligro la estabilidad total del servidor. Junto con esto, la capacidad para bloquear los puertos TCP que entrega la plataforma Amazon AWS protege al servidor de ataques informáticos, que dependen únicamente del sistema operativo que soporta la plataforma. En el proceso de diseño del terminal maestro, se decidió por la utilización del algoritmo de comunicación por procesos múltiples, que fue probado de manera independiente para permitir teóricamente la comunicación simultánea con infinitos terminales remotos.

En el caso de la interfaz visual y el servidor Web, se limitaron todas las instancias en donde el cliente puede interactuar con la plataforma, a modo de protegerla de ataques informáticos de manera indirecta, a partir de la ejecución de código malicioso hacia la base de datos. Con la implementación del servidor Web en base a la herramienta Flask, además de la utilización de SQLAlchemy para la conexión con la base de datos, se pudo proteger esta comunicación para eliminar la posibilidad de un ataque informático a través de esta plataforma visual. En términos de estabilidad, la plataforma visual permite entregar todos los parámetros eléctricos capturados desde la red de baja tensión con una velocidad relativamente rápida, limitada por el intervalo de diez minutos que define el tiempo real en el proyecto. Todos los tiempos de ejecución de código y de manipulación de información cumplen con la visualización de los parámetros eléctricos bajo este concepto de tiempo real, a causa de la elección de un intervalo temporal de diez minutos le da una gran ventana de tiempo a todos los elementos de software que conforman el terminal remoto, junto con la generación de gráficos y la entrega de información en pantalla. En la figura 6-2 se puede observar la capacidad multiplataforma del sistema de monitoreo, que fue alcanzada a partir de la selección de componentes y la definición del servidor Web para la generación de los elementos visuales. Con esto se pudo asegurar que la visualización del sistema no este limitada a la utilización de herramientas específicas de software, o sistemas operativos específicos.

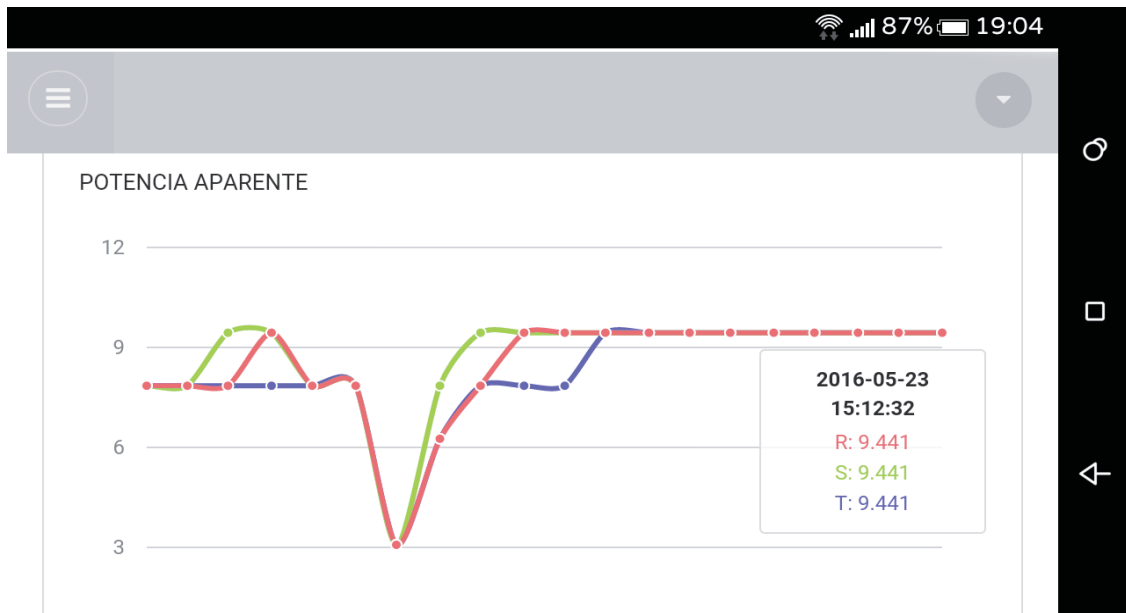


Figura 6-2 Interfaz Web visualizada a través de un Smartphone

La estabilidad y el desempeño del sistema de monitoreo se ve afectado por varios factores ya mencionados, pero no se debe dejar de lado la capacidad de los administradores del sistema para realizar su mantenimiento, a modo de que se puedan prevenir problemas de hardware y software dentro de los elementos que conforman el sistema de monitoreo. Bajo este postulado, se debe destacar la elección de componentes físicos de manera modular, lo que permite el reemplazo de los mismos en caso de un mal funcionamiento en el desempeño del terminal remoto. Esta característica modular es transversal al sistema diseñado, por lo que se puede atacar cualquier problema presentado en el futuro con un análisis detallado de los elementos internos que conforman el sistema de monitoreo remoto.

7 Evaluación económica

El sistema de monitoreo diseñado fue pensado como un servicio complementario a la red eléctrica, en base a las ideas propuestas bajo el concepto de la red inteligente a nivel mundial. Este servicio, enfocado a las empresas del rubro de la distribución eléctrica, les entregará las herramientas necesarias para visualizar el comportamiento de la red eléctrica de baja tensión en sectores geográficos específicos, lo que se afectará a los consumidores de energía eléctrica, reduciendo los tiempos de espera en casos de corte de servicio, o en la presencia de problemas específicos a un sector geográfico.

7.1 Análisis de costos

Para caracterizar el proyecto desarrollado dentro del mercado económico actual, se realizó un análisis económico a partir de la base de una implementación de cinco años, en donde se estudió por una parte la construcción y la instalación de los terminales remotos en la red eléctrica de baja tensión, para después analizar los costos asociados al mantenimiento del sistema durante los años que dura el proyecto. Esta diferenciación se llevó a cabo para analizar los costos de la inversión inicial, además de los costos mensuales asociados por cada terminal remoto implementado en la red eléctrica. Este escenario ficticio permitió definir una propuesta económica, para presentar al proyecto desarrollado dentro del mercado económico actual del país, a modo de identificar sus características económicas, y los costos asociados al escalamiento en su implementación. El costo asociado a la implementación del sistema considera la selección de componentes físicos, en contraste al costo de mantenimiento, que considera los costos asociados a la administración y al software utilizado.

Para la implementación del sistema de monitoreo remoto, los costos asociados a los elementos físicos que conforman el terminal remoto son la mayor inversión que se debe asumir, a partir de que la utilización de software de código abierto no incrementa el costo de construcción por la no necesidad de adquirir licencias para su uso. Otro elemento a considerar, es la disminución de los costos de construcción por la compra al por mayor de los componentes físicos, que es un factor que no se puede estimar de manera clara, pero que se debe considerar al momento de presentar la implementación del sistema. Estos costos de producción fueron calculados a partir de la selección de componentes realizada anteriormente, junto con la necesidad de contratar a personas capacitadas para llevar a cabo la conformación de los

terminales remotos, que se estimó un número de una persona por cada 50 terminales remotos a construir, en base a la característica modular presentada en el diseño de los terminales, junto con considerar un tiempo estimado de un mes para la construcción de los 50 terminales remotos. Además, se tuvo que tomar en consideración el arriendo de un espacio para llevar a cabo esta construcción, con todos los gastos relacionados a la utilización de este espacio. Al momento de iniciar el proceso de implementación del sistema en la red eléctrica, es necesaria la habilitación de un lugar físico para llevar a cabo la construcción de los terminales remotos, por lo que este factor está asociado a los costos de construcción y no a los costos de mantenimiento del sistema, y presenta un aumento en los costos de la inversión inicial.

Tabla 7-1 Costos de construcción del terminal remoto

Costos	Valor (pesos)
Arriendo	500.000
Electricidad	80.000
Internet	60.000
Telefonía	30.000
Componentes RTU	500.000
Técnico Electricista	510.000
Total	1.680.000

En la tabla 7-1 se puede observar el análisis de costos asociados a la construcción de un solo terminal remoto, en donde se estimó un costo de \$1.680.000 para llevar a cabo este proceso, tomando en consideración todos los elementos presentados anteriormente. Cuando se realizó un análisis ajustando el costo de producción unidad, teniendo en cuenta la necesidad de un técnico electricista cada 50 terminales remotos a construir, se llegó a un costo de producción aproximado de \$520.000 que se mantuvo constante al aumentar el número de terminales a construir.

Tabla 7-2 Costos unitarios de construcción de terminales remotos

Cantidad	Costo total	Costo unitario
1	1.680.000	1.680.000
10	6.270.000	627.000
20	11.370.000	568.500
30	16.470.000	549.000
40	21.570.000	539.250
50	26.570.000	531.400
60	31.770.000	529.500
70	36.870.000	526.714
80	41.970.000	524.625
90	47.070.000	523.000
100	52.170.000	521.700

Con esto, se encuentra el número mínimo de terminales remotos para la implementación final del sistema, en donde se puede estimar un costo de construcción sin variaciones. Este número mínimo de 50 terminales remotos es el límite inferior para la venta del servicio de monitoreo remoto, ya que los costos asociados a la construcción de menos de 50 terminales remotos aumenta considerablemente en comparación a la construcción de más de 50 terminales, en donde el costo unitario por terminal remoto se ajusta a un valor estable de \$520.000. Este valor encontrado es asumido como un costo de construcción estándar, ya que luego de los 50 terminales el valor se ajusta a un número constante.

Tabla 7-3 Costos de mantenimiento del sistema

Costos Administrativos	Costo Mensual (Pesos)	Costo Anual (Pesos)
Combustible	400.000	4.800.000
Amazon AWS	50.000	600.000
Artículos de aseo	100.000	1.200.000
Personal de aseo	250.000	3.000.000
Equipos computacionales	33.333	400.000
Personal de ingeniería	5.000.000	60.000.000
Personal de mantenimiento	2.000.000	24.000.000
Personal Administrativo	4.000.000	48.000.000
Total	11.833.333	142.000.000

En el caso del mantenimiento del sistema, se incluyeron los costos de administración, junto con el arriendo de un lugar para llevar a cabo este proceso y los costos asociados a esto. Este análisis se puede observar en la tabla 7-3, que incluye los sueldos del personal administrativo, los costos asociados a la movilización del personal de mantenimiento y los costos asociados al mantenimiento del lugar de trabajo. Con este análisis, se pudo observar que los costos de mantenimiento presentan una naturaleza fija, puesto que al realizar ajuste a la tabla a partir del costo unitario por terminal remoto implementado en la red eléctrica, estos costos unitarios no se mantienen constantes como fue el caso de la construcción de los terminales remotos, sino que disminuyen a un valor nulo. A partir de la característica relativa de costos fijos de administración, se decidió por utilizar un costo unitario de mantenimiento calculado a partir de la mínima cantidad de 50 terminales remotos a implementar, lo que entregó un costo de mantenimiento mensual de \$236.667 por cada terminal remoto a implementar en la red eléctrica.

7.2 Escenario económico

Al encontrar los costos asociados a la construcción de los terminales remotos, junto con el costo asociado al mantenimiento del sistema en el tiempo, se realizó una propuesta para estudiar la viabilidad del proyecto en un escenario ficticio, a modo de caracterizar el proyecto realizado como un servicio de monitoreo de las redes de baja tensión. El escenario económico considera una implementación gradual del sistema de monitoreo por parte de tres empresas del rubro de la distribución eléctrica, ubicadas en distintos sectores geográficos, y en donde se realiza

en primera instancia una prueba del sistema a modo de demostración, a partir de la implementación de un número menor de terminales remotos, para luego iniciar el proceso de puesta en marcha del sistema como fue analizado anteriormente, tomando en consideración los 50 terminales remotos como el número mínimo viable, y asociando los costos de mantenimiento calculados para esa cantidad de terminales a implementar. Este método progresivo de implementación del sistema se basa en la naturaleza innovadora del sistema, a modo de que las empresas logren comprender los beneficios del sistema durante el periodo de demostración del mismo.

Tabla 7-4 Resumen de costos asociados al servicio de monitoreo remoto

Costos	Valor anual (pesos)
Construcción de terminal remoto unitario	1.680.000
Construcción de 50 terminales remotos	26.000.000
Mantenimiento por terminal remoto	2.840.000

La tabla 7-4 se presentan los tres costos necesarios para caracterizar el escenario económico del proyecto diseñado, que consideran el costo asociado a la construcción de un terminal remoto unitario, que representa la inversión inicial al momento de implementar el sistema en su etapa de pruebas, junto con los costos de mantenimiento y reposición de terminales remotos al momento de implementar el sistema. A partir de estos valores, se pudo caracterizar la puesta en marcha del sistema de monitoreo en base a sus costos asociados, y se planteó el siguiente escenario económico para realizar el análisis correspondiente, dividiendo el proceso de venta en dos etapas de implementación para asegurar que el cliente final comprenda los beneficios del sistema diseñado.

- El sistema de monitoreo diseñado es un servicio.
- La implementación del servicio consta de dos fases.
- Se inicia el proceso de venta con la implementación de una demostración del sistema durante 3 meses, que consiste en la instalación de 5 terminales remotos en la red de baja tensión.
- Luego de realizar la demostración del sistema, se procede a la implementación de un mínimo de 50 terminales remotos en la red eléctrica de baja tensión, habilitando un lugar geográfico específico para el mantenimiento y la construcción de los elementos por cada empresa presente en este análisis.
- En cada periodo de análisis se realizan reposiciones a los terminales remotos, considerando la construcción total de cada terminal defectuoso.

En base a la formulación de este escenario económico, se realizó un flujo de caja considerando una implementación en cinco años, en donde se utilizaron todos los puntos mencionados anteriormente, que representan los costos asociados a la inversión inicial, el mantenimiento del sistema y la reposición de terminales remotos defectuosos.

7.3 Flujo de caja

Para realizar el flujo de caja dentro del análisis económico se asumió el costo de la inversión inicial sin considerar las alternativas del mercado en el ámbito crediticio. Esta decisión se basa en el concepto derivado a la puesta en marcha del servicio de monitoreo, que por su naturaleza es considerado como un proyecto a largo plazo, y que por este motivo, no presenta un gran riesgo de inversión. Un elemento importante presente en el análisis económico realizado fue la ubicación geográfica que abarca cada empresa del rubro eléctrico, a partir del gran tamaño que presentan las redes de baja tensión. En base a esto, fue necesario habilitar una central operativa por cada venta realizada dentro del análisis económico, considerando los costos asociados al arriendo y los gastos derivados de la utilización de esta central.

Tabla 7-5 Flujo de caja

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Resumen de costos						
<i>Mantenimiento</i>						
Combustible	3.600.000	4.800.000	4.800.000	8.400.000	9.600.000	13.200.000
Amazon AWS	450.000	600.000	600.000	1.050.000	1.200.000	1.650.000
Artículos de aseo	900.000	1.200.000	1.200.000	2.100.000	2.400.000	3.300.000
Personal de aseo	2.250.000	3.000.000	3.000.000	5.250.000	6.000.000	8.250.000
Eq. computacionales	300.000	400.000	400.000	700.000	800.000	1.100.000
Personal de ingeniería	45.000.000	60.000.000	60.000.000	105.000.000	120.000.000	165.000.000
mantenimiento	18.000.000	24.000.000	24.000.000	42.000.000	48.000.000	66.000.000
Personal Administrativo	36.000.000	48.000.000	48.000.000	84.000.000	96.000.000	132.000.000
<i>Construcción de RTU</i>						
Arriendo	4.500.000	6.000.000	6.000.000	10.500.000	12.000.000	16.500.000
Electricidad	720.000	960.000	960.000	1.680.000	1.920.000	2.640.000
Internet	540.000	720.000	720.000	1.260.000	1.440.000	1.980.000
Telefonía	270.000	360.000	360.000	630.000	720.000	990.000
Componentes RTU	25.000.000	3.000.000	2.000.000	104.500.000	16.500.000	523.500.000
Técnico Electricista	4.590.000	6.120.000	6.120.000	24.480.000	36.720.000	128.520.000
Total	142.120.000	159.160.000	158.160.000	391.550.000	353.300.000	1.064.630.000
Resumen de ingresos						
Prestación de servicios	135.000.000	180.000.000	180.000.000	720.000.000	900.000.000	3.600.000.000
Total	135.000.000	180.000.000	180.000.000	720.000.000	900.000.000	3.600.000.000
Flujo de caja	-7.120.000	20.840.000	21.840.000	328.450.000	546.700.000	2.535.370.000

En la tabla 7-5 se presenta en flujo de caja relacionado al escenario económico propuesto, en donde se consideran tres empresas del rubro eléctrico que inician su etapa de demostración del sistema en el año 1, 3 y 5 respectivamente. Cada una de estas empresas realiza la prueba del sistema durante un periodo de tres meses, para luego iniciar la implementación paulatina del sistema de monitoreo remoto, aumentando la cantidad de terminales remotos instalados en la

red de baja tensión. Para simplificar el desarrollo del flujo de caja, se decidió por incrementar el número de terminales en el periodo 1, 3 y 5, pasando de 50, 200 y 1000 terminales remotos respectivamente, que se relacionan a la puesta en marcha de cada una de las empresas consideradas en este estudio. Junto con esto, se propuso un número aleatorio de reposiciones totales de terminales remotos en cada periodo del análisis, que aumentan en relación al número de terminales remotos instalados en la red eléctrica. En el caso de las reposiciones, solo se asumió el costo de los componentes para su desarrollo, a partir de que el costo de habilitación del centro de operaciones se realizó dentro de la inversión inicial. Con esto se pudo calcular el costo total asociado a la implementación y mantenimiento de los tres proyectos durante un plazo de 5 años, y para definir el valor comercial asociado al proyecto, se decidió por fijar un valor de \$300.000 mensual por cada terminal remoto instalado en la red de baja tensión. Este valor comercial caracteriza económicamente al proyecto de monitoreo remoto, y permitió obtener un flujo de caja positivo luego del primer año de implementación del sistema de monitoreo remoto.

A partir de la realización del flujo de caja, se calcularon los indicadores económicos que caracterizan a esta implementación, considerando una tasa de retorno del 10% en el cálculo del valor anual neto, lo que entregó un valor aproximado de \$2.022.102.853 para el VAN, y un TIR del 467%.

7.4 Conclusiones finales del análisis

El análisis económico realizado logró caracterizar al sistema de monitoreo remoto como un servicio privado, en donde los costos asociados a su implementación disminuyen considerablemente si el número de terminales remotos a instalar supera el número de 50 equipos. Este punto es beneficioso para la implementación futura de este sistema, ya que la formulación del proyecto fue pensado para abarcar una gran área geográfica, a fin de permitir visualizar el comportamiento de la red de baja tensión durante el tiempo. Este elemento se vio reflejado en el flujo de caja realizado, que demuestra la capacidad de escalar el sistema de forma gradual al aumentar el número de terminales remotos instalados en la red eléctrica, sin poner en riesgo la viabilidad económica del servicio. En base a los resultados obtenidos, y junto con los estudios del estado del arte realizados en este documento, se puede posicionar al sistema de monitoreo remoto dentro del panorama económico mundial como una alternativa viable y de bajo costo, lo que refleja los objetivos dispuestos al inicio de la formulación de este sistema.

Discusión y conclusiones

Durante el transcurso del desarrollo de este proyecto se destacaron puntos importantes que ayudaron a definir el sistema presentado, junto con los obstáculos presentes en el ambiente que atentan contra la efectividad y estabilidad en el monitoreo de la red de baja tensión, como la disponibilidad de la red móvil 3G, el clima específico del sector geográfico en donde se instalan los terminales remotos, junto con la posibilidad de la presencia de ataques informáticos en cada uno de las áreas de desarrollo del proyecto. Esta identificación de los elementos que atentan contra el funcionamiento del sistema, ayudó a definir procesos que permiten proteger las áreas afectadas por los mismos, como la implementación de la generación de claves privadas bajo el algoritmo de encriptación Diffie-Hellman, además de definir los protocolos previos a la implementación del sistema en la red eléctrica. El único elemento que no pudo ser analizado en este documento, es la posibilidad de un ataque físico al terminal remoto dentro de la red eléctrica, dado que su presencia es completamente aleatoria y no existen métodos en la actualidad para proteger al terminal remoto de una manipulación externa, pero en relación a este factor externo, la definición del sistema de monitoreo de forma modular permite la fácil reposición de los elementos que presenten fallas, y bajo esta idea, es posible la reparación de los terminales remotos de forma rápida, lo que ayuda a la mantención del sistema de monitoreo en el tiempo.

Al momento de identificar la problemática que ataca el sistema diseñado, se analizaron las propuestas existentes en la actualidad bajo el concepto del Smart Grid, lo que generó otro problema fundamental para el desarrollo e implementación futura del sistema de monitoreo diseñado. La popularidad en la implementación de medidores inteligentes en la actualidad entrega herramientas valiosas para el monitoreo de la red de baja tensión, pero lamentablemente este punto no ha sido analizado en totalidad, a partir de la naturaleza innovadora de este producto dentro del mercado actual. Esta implementación del concepto de Smart Grid ha sido impulsada bajo esta naturaleza innovadora, sin considerar el verdadero efecto que conlleva su desarrollo dentro de la red eléctrica, lo que ha llevado a solo ser utilizados como herramientas de mayor precisión al momento de medir la energía eléctrica utilizada por los consumidores, sin considerar la información bruta generada por estos medidores inteligentes. El desarrollo del sistema de monitoreo remoto presente en este documento, puede ser contrastado a partir de la información generada por la implementación de medidores inteligentes, pero lamentablemente esta doble inversión por parte de las empresas distribuidoras de energía eléctrica, genera una limitante al momento de presentar el proyecto diseñado en el mercado actual, ya que esta generación de

información no es el objetivo de estas empresas en la actualidad, a consecuencia de la falta de fiscalización de los entes gubernamentales, y de la ignorancia sobre el efecto positivo que presentaría esta información para el control de la red eléctrica de baja tensión.

Bajo esta idea, es posible que en un futuro este proyecto sea una herramienta imprescindible para el funcionamiento de la red de baja tensión, por lo que el desarrollo de este estudio ofrece una posibilidad de visualizar esta idea bajo el concepto de Smart Grid, pero a consecuencia de los puntos presentados anteriormente, junto con el análisis de la normativa legal sobre la calidad del servicio eléctrico, la implementación real de este sistema de monitoreo remoto en el territorio de este país no es posible bajo los paradigmas actuales presentes en las empresas del rubro eléctrico. Es lógico pensar que en el futuro se exijan por parte de los entes fiscalizadores la implementación de sistemas de monitoreo de las redes de baja tensión, ya que el costo de las herramientas electrónicas para realizar este proceso han disminuido constantemente durante el tiempo, pero este cambio en la normativa legal no es posible analizarlo en el momento que se desarrolló este documento, ya que las variables presentes en este cambio de la normativa legal presentan rasgos políticos y sociológicos, que se escapan de los conocimientos adquiridos en los estudios de la ingeniería electrónica.

Pese a esta cualidad desalentadora presente en la actualidad, es necesario el desarrollo de proyectos que permitan visualizar el futuro de la red eléctrica, debido a que la implementación del concepto de Smart Grid no es un factor que se pueda eliminar para el futuro cercano, sino que se debe comprender, junto con ayudar a que esta idea se pueda implementar en la totalidad de la red eléctrica. Esta red de información complementaria es un concepto que cambia totalmente la idea de la red eléctrica como es conocida en la actualidad, y por este motivo, es difícil comprender en la actualidad los beneficios que puede llegar a entregar a las empresas y a la sociedad. Por este motivo, es necesario seguir con el desarrollo de estos estudios teóricos, a modo de comprender los métodos correctos de implementar los sistemas en la red eléctrica, junto con analizar el efecto social y económico que se pueden presentar a partir de la generación de información del comportamiento de la red eléctrica. Otro factor a considerar, es la creación del mercado de las herramientas bajo el concepto de Smart Grid, lo que permite generar claros beneficios económicos para las empresas del rubro eléctrico y para las empresas encargadas de diseñar estos sistemas de manera conjunta, además de permitir la actualización de los métodos de distribución eléctrica existentes en la actualidad.

Para finalizar la redacción de este documento, es necesario resaltar la utilización de elementos electrónicos innovadores dentro de la generación de proyectos de ingeniería electrónica, puesto que lamentablemente este factor es mal visto por la ingeniería clásica, que es relacionado a una sensación falsa de inestabilidad del producto final. El sistema de monitoreo remoto diseñado hubiera sido imposible de desarrollar a partir de la utilización de elementos tradicionales dentro de la teoría del control automático, ya que la utilización de estos dispositivos electrónicos innovadores presentan un menor costo dentro del mercado actual, en contraste con la adquisición de componentes tradicionales en donde su funcionamiento ha sido estudiado y comprobado.

El paradigma respecto a la utilización de elementos innovadores es una limitante para la investigación y el desarrollo de sistemas de control automático, debido a que inhiben la creatividad del ingeniero para ajustarse al esquema establecido por la industria.

A partir de la naturaleza académica del proyecto diseñado, es necesario destacar una serie de puntos importantes a considerar si se desea seguir con la investigación en el área del monitoreo de las redes de baja tensión, que permiten la expansión de la idea del control automático dentro de la transmisión de energía eléctrica. Los siguientes elementos no pudieron ser desarrollados dentro del presente estudio, pero es necesaria su investigación y desarrollo para comprender en mayor detalle el impacto y los modos de implementación de las redes inteligentes a nivel global.

- Mejorar la configuración a distancia de los terminales remotos
- Implementar sistemas de respaldo para la comunicación inalámbrica
- Disminuir el tamaño de los terminales remotos
- Crear un estándar para la construcción y calibración de terminales remotos
- Disminuir el tiempo entre toma de muestras
- Desarrollar un sistema capaz de generar información en base a las mediciones de múltiples terminales remotos, a modo de caracterizar el comportamiento eléctrico de áreas geográficas extensas
- Implementar mecanismos para la comunicación entre terminales remotos
- Mejorar la visualización grafica de los parámetros eléctricos

Bibliografía

- [1] M. d. Energia, «Decreto 327,» de *FIJA REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DE SERVICIOS ELECTRICOS*, 1998, p. 94.
- [2] SEC, «Ranking 2014 de Calidad de Servicio de las Empresas de Distribución de Electricidad,» 2014. [En línea]. Available: http://www.sec.cl/pls/portal/docs/PAGE/SECNORMATIVA/RANKING%20ELECTRICAS/PRESENTACION_RANKING_2014.PDF.
- [3] E. Parliament, «Smart electricity grids and meters in the EU Member States,» September 2015. [En línea]. Available: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568318/EPRS_BRI\(2015\)568318_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568318/EPRS_BRI(2015)568318_EN.pdf).
- [4] E. I. A. U.S, «Smart meter deployments continue to rise,» November 2012. [En línea]. Available: <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=8590>.
- [5] R. Buyer, «Asia-Pacific Smart Grid Market 2015 Update,» September 2015. [En línea]. Available: <https://www.reportbuyer.com/product/3312053/asia-pacific-smart-grid-market-2015-update.html>.
- [6] G. Maps, «Smart Metering Projects Map,» [En línea]. Available: https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?mid=19VuB2oies9alz5weWYwRKdB1j9k&hl=en_US.
- [7] Chilectra, «Sistema de Medición Inteligente,» [En línea]. Available: <https://www.chilectra.cl/Preguntas-Frecuentes/Medicion-Inteligente>.
- [8] S. A. Boyer, *Scada: Supervisory Control And Data Acquisition*, USA: International Society of Automation, 2009.
- [9] S. d. Telecomunicaciones, Marzo 2015. [En línea]. Available: http://www.subtel.gob.cl/wp-content/uploads/2015/04/PPT_Series_DICIEMBRE_2015_V5.pdf.

- [10] R. P. Foundation, «Raspberry Pi 2 Model B,» [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/>.
- [11] M. IDA, «MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION,» [En línea]. Available: http://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b.pdf.
- [12] SQLAlchemy, «The Python SQL Toolkit and Object Relational Mapper,» [En línea]. Available: <http://www.sqlalchemy.org/>.
- [13] A. Ronacher, «Flask: web development, one drop at a time,» [En línea]. Available: <http://flask.pocoo.org/>.
- [14] I. Wolfram Research, «Diffie-Hellman Protocol,» [En línea]. Available: <http://mathworld.wolfram.com/Diffie-HellmanProtocol.html>.
- [15] UNI-T, «UT200,» [En línea]. Available: <http://www.uni-trend.com/Productslist2.aspx?ProductsCateID=919&IntroCateId=919&CateID=919&CurrCateID=919>.
- [16] I. Xplore, «754-2008 - IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic,» [En línea]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4610933>.
- [17] D. S. Foundation, «The web framework for perfectionists with deadlines,» [En línea]. Available: <https://www.djangoproject.com/>.
- [18] JSON, «JavaScript Object Notation,» [En línea]. Available: <http://www.json.org/>.
- [19] TechEmpower, «Web Framework Benchmarks,» [En línea]. Available: <https://www.techempower.com/benchmarks/>.

A Diseño de software

En el proceso de selección de los componentes que conforman el sistema de monitoreo remoto, se eligió por la utilización del lenguaje de programación Python de forma transversal al diseño de software dentro del sistema. Esta decisión se realizó para generar un desarrollo de software homogéneo, a fin de utilizar las mismas metodologías dentro de la composición de los elementos de software en el servidor en la nube y el terminal remoto. La utilización del lenguaje de programación Python exige la generación de un archivo maestro, en donde se estipulen todos los procesos que se ejecutarán en paralelo dentro del software diseñado, junto con las librerías o los comandos necesarios para su funcionamiento. Este archivo maestro fue generado en cada uno de los elementos de software desarrollados en este estudio, y mantienen la misma sintaxis en el inicio de su ejecución

Listado A-A-1 Archivo maestro en lenguaje Python

```
1 import thread
2 import time
3 from modulos import *
4
5 def proceso1():
6     while True:
7         print "proceso #1"
8         time.sleep(0.5)
9
10 def proceso2():
11     while True:
12         print "proceso #2"
13         time.sleep(0.5)
14
15 if __name__ == "__main__":
16     thread.start_new_thread(proceso1, ())
17     thread.start_new_thread(proceso2, ())
18
19     while True:
20         print "firmware ejecutandose"
21         time.sleep(1)
```

En el código listado anterior, se puede observar la ejecución de dos procesos independientes a partir de la generación de un archivo maestro, lo que permitió la ejecución de los procesos definidos dentro del funcionamiento del firmware del terminal remoto, y los

elementos de software diseñados para su ejecución en el servidor. Este método se pudo realizar a partir de la inclusión de la librería *thread* que se observa en la primera línea de código. Al finalizar la definición de los procesos, el software identifica al archivo maestro y ejecuta los códigos asociados para iniciar los procesos independientes, para finalizar con un bucle infinito que entregue información de que el sistema se ejecutó correctamente. En el caso del diseño del firmware para el terminal remoto, se utilizó este bucle para encender y apagar un led, a modo de entregar información visual de que el firmware se está ejecutando correctamente. Este código se puede observar en el listado A-2, en donde se utilizó la librería creada para el control de los pines digitales presentes en la placa Raspberry Pi.

Listado A-A-2 Parpadeo de led en lenguaje Python

```
1 import RPi.GPIO as GPIO
2 import time
3
4 GPIO.setwarnings(False)
5 GPIO.setmode(GPIO.BCM)
6 GPIO.setup(18, GPIO.OUT)
7 print "INICIANDO BLINK"
8
9 while True:
10     GPIO.output(18, True)
11     time.sleep(0.5)
12     GPIO.output(18, False)
13     time.sleep(0.5)
14
```

Estas librerías incluidas en el sistema operativo Raspbian ayudaron al control de la placa Raspberry Pi desde el punto de vista electrónico, lo que facilitó la captura de los parámetros eléctricos a través de la comunicación serial, además de permitir la comunicación SPI para la extracción de los valores de tensión presentes el convertidor análogo digital en la placa electrónica de regulación de tensión. Para el caso de la inclusión del reloj de tiempo real y el modem para la comunicación 3G, el sistema operativo fue configurado a modo que la interacción con estos componentes se realizara de forma nativa, eliminando la necesidad de controlar estos procesos, ya que los mismos se habilitan al momento de iniciar la ejecución del sistema operativo.

Otro elemento de software que fue relevante al momento de diseñar las herramientas de software, fue el algoritmo para la comunicación por procesos múltiples, que está presente dentro de la ejecución del sistema de alarmas y el terminal remoto. Este algoritmo crea un socket para la comunicación TCP, que escucha al puerto destinado para esta comunicación a modo de crear la conexión entre el software y algún elemento externo, para luego crear un proceso al cual adjunta el socket creado, a modo de permitir replicar de forma infinita el socket creado. En las pruebas realizadas a este algoritmo, se pudieron realizar un número significativo de conexiones simultáneas sin poner en riesgo la estabilidad del software diseñado, lo que asegura que en teoría se puedan generar infinitas conexiones a partir de este algoritmo.

Listado A-A-3 Algoritmo de comunicación por procesos múltiples

```

1 import socket
2 import thread
3
4 def procesol(conn):
5     ....
6     ....
7
8 if __name__ == "__main__":
9     s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
10    s.setsockopt(socket.SOL_SOCKET, socket.SO_REUSEADDR, 1)
11    s.bind(('', 5555))
12    s.listen(10)
13
14    while True:
15        conn, addr = s.accept()
16        start_new_thread(thread_alarmas, (conn,))

```

En el código presente en el listado A-3 se presenta el algoritmo mencionado anteriormente, en donde se inicia incluyendo las librerías de comunicación TCP para luego definir el proceso a ejecutar cuando se realice la comunicación exitosa, el cual incluye el socket de esta conexión llamado *conn*. Con esto, el software diseñado procede a la creación del software en modo escucha al puerto 5555, el cual lo deja esperando a que se realice una conexión exitosa para adjuntar este socket al proceso definido anteriormente.

Para finalizar este análisis de software, es necesario presentar el método utilizado para la generación de las rutas de acceso en la interfaz visual, basada en la creación de elementos de software bajo la herramienta Flask. Estas rutas de acceso fueron definidas a partir del método en el cual se incluirán los elementos visuales generados por el servidor, ya que en los casos en donde los elementos presentados en la pantalla no requieren su actualización dinámica, se incluyó esta información de manera explícita en la plantilla utilizada. El framework Flask consta de dos áreas de desarrollo que permiten la visualización de elementos en formato Web, en primer lugar, es necesario la creación de plantillas HTML que permitan la inclusión de los elementos gráficos generados por el servidor, y en segundo lugar, se deben programar las rutas de acceso al servidor Web, a modo de configurar la respuesta de software a realizar en relación a esta ruta de acceso. Esta definición de rutas de acceso se puede observar en el siguiente código.

Listado A-A-4 Definición de rutas de acceso

```

1 @app.route('/alarmas')
2 @login_required
3 def alarmas():
4     distribuidora = Distribuidora.query.one()
5     getuser = GetUsuario()
6
7     alarmas = Alarmas.query.order_by(Alarmas.fecha.desc()).all()
8
9     return render_template('alarmas.html',
10                            menu='alarmas',
11                            distribuidora=distribuidora.nom_dist,
12                            usuario=getuser,
13                            alarmas=alarmas)

```

En el listado A-4 se observa la definición de la ruta de acceso relacionada al sistema de alarmas, en donde se explicita la ruta de acceso al inicio del código, junto con la especificación de que se debe realizar la identificación de usuario antes de poder visualizar este elemento Web. Luego se define el proceso que se ejecuta al momento que el usuario ingresa a esta ruta, en donde se extraen la información de usuario, la información de la empresa y las alarmas almacenadas en la base de datos, a través de la herramienta de software SQLAlchemy. Cuando estas peticiones se extraen correctamente desde la base de datos, se le incluyen a la plantilla HTML que corresponde a la pantalla del sistema de alarmas, para luego permitir la visualización de esta información en la página Web. La utilización de la base de datos a partir del framework SQLAlchemy se incluye dentro del apéndice B, junto con las definiciones de las tablas a utilizar y los métodos de conexión a las bases de datos.

En el diseño de las plantillas HTML para la utilización dentro del framework Flask, se tuvo realizar la diferenciación entre las variables incluidas por software y la interpretación de las respuestas JSON generadas por el servidor Web. En el caso presentado en el listado A-4, se puede observar en la línea 13 el método utilizado para la inclusión de las respuestas obtenidas desde la base de datos directamente a la plantilla HTML relacionada a la visualización de alarmas, y en este caso, se utilizó el método de interpretación de estas respuestas para generar el elemento visual.

Listado A-A-5 Plantilla HTML del sistema de alarmas

```

1 <table>
2   {% for dato in alarmas %}
3   <tr>
4     <td>{{dato.fecha}}</td>
5     <td>{{dato.rtu_id}}</td>
6     <td>{{dato.alarma}}</td>
7     <td>
8       {% if dato.alarma[0] == "1" %}
9         Iniciando unidad remota
10      {% else %}
11        {% if dato.alarma[0:6] == "000000" %}
12          Funcionamiento correcto
13        {% else %}
14          Problemas de suministro
15          {% if dato.alarma[0] == "1" %}
16            (Problemas en frecuencia fundamental)
17          {%endif%}
18          {% if dato.alarma[1] == "1" %}
19            (Tension sobre 229 V)
20          {%endif%}
21          {% if dato.alarma[2] == "1" %}
22            (Tension sobre 210 V)
23          {%endif%}
24        {% endif%}
25      {% endif%}
26    </td>
27    <td><a href="/id/{{dato.rtu_id}}">Ver detalle</a></td>
28  </tr>
29  {% endfor %}
30 </table>

```

En el código presente en el listado A-5, se observa el código HTML utilizado para la creación de una tabla gráfica, en donde se interpreta la variable incluida desde el desarrollo de software utilizando el framework Flask. Este código se inicia ejecutando un bucle por cada alarma presente en la respuesta de la lectura de la base de datos, para luego ingresar en cada casilla los elementos presentes, a modo de rellenar una fila en la tabla generada. El término de esta generación del elemento visual está relacionado a la cantidad de filas que capturó el software desde la base de datos, y con esto se da término al bucle al cerrar el elemento visual de la tabla generada. Se puede observar en la línea 18 la interpretación de la variable almacenada correspondiente a la alarma capturada, en donde se leen las variables lógicas como 0 y 1 para entregar un resumen en forma de texto del problema identificado.

Para el caso específico de los elementos dinámicos en la interfaz visual diseñada, se utilizó un código en lenguaje Javascript capaz de interpretar las respuestas JSON generadas por el servidor, para luego generar los elementos visuales correspondientes a la información proporcionada por esta respuesta JSON. Al utilizar el lenguaje de programación Javascript, se logró realizar la actualización automática de los elementos visuales presentados a través de la interfaz visual, sin necesidad de interactuar directamente con el software diseñado en lenguaje Python. Este código realizado se puede observar en el listado A-6, en donde se identifica en la segunda línea el intervalo temporal de diez segundos para realizar la actualización dinámica de la información, junto con el código utilizado para generar los gráficos temporales y en el dominio de la frecuencia, además de la presentación de los parámetros eléctricos en forma de texto, correspondientes a la última iteración del sistema de monitoreo. El código diseñado hace uso de la herramienta de software JQuery, que facilita la interpretación de las respuestas JSON, y la librería Morris.js, que permite la generación de los gráficos presentes en esta ruta de la interfaz visual. Como se analizó anteriormente, la ejecución de este código junto con el tiempo de respuesta del servidor Web conlleva a un intervalo temporal de 1 segundo, y por este motivo se decidió por realizar la actualización temporal en un intervalo de 10 segundos, a forma de reducir la utilización de recursos por parte del servidor del sistema de monitoreo, y por el navegador Web utilizado por el cliente del sistema.

Listado A-A-6 Interpretación de respuestas JSON

```

1 <script>
2 var timer = setInterval(refresh, 10000);
3 function refresh () {
4     $.getJSON("/json_voltaje/{identificador}/20", function( json ) {
5         graphV.setData(json.list);
6         $("#fecha").html("<b>Valor recibido:</b> " + json.list[0]['y']);
7         $("#v_r").html("<b>R:</b> " + json.list[0]['a'] + " V");
8         $("#v_s").html("<b>S:</b> " + json.list[0]['b'] + " V");
9         $("#v_t").html("<b>T:</b> " + json.list[0]['c'] + " V");
10    });
11    $.getJSON("/json_distorsion_armonica_voltaje/{identificador}/20",
12    function( json ) {
13        graphTHDv.setData(json.list);
14        $("#thd_vr").html("<b>R:</b> " + json.list[0]['a']);
15        $("#thd_vs").html("<b>S:</b> " + json.list[0]['b']);
16        $("#thd_vt").html("<b>T:</b> " + json.list[0]['c']);
17    });
18 }

```

B Comunicación con la base de datos

Dentro del desarrollo del sistema de monitoreo remoto, se mencionó la utilización de la herramienta de software SQLAlchemy para la interacción entre el desarrollo de software y la base de datos PostgreSQL. Esta herramienta fue utilizada por todos los elementos de software que conforman el servidor del sistema, a modo de permitir una homogeneidad en el proceso de comunicación con la base de datos, además de permitir el fácil cambio en casos donde se requiera utilizar otro sistema de bases de datos relacionales, a partir de la capacidad de adaptación en la generación de conexión en esta herramienta de software. Otra característica importante que entrega la herramienta SQLAlchemy, es la creación automática de las tablas a partir de la definición de las clases relacionadas a las mismas, en el momento de ejecutar el software diseñado.

Listado B-1 Implementación de framework Flask y SQLAlchemy

```
1 from flask import Flask
2 from flask.ext.sqlalchemy import SQLAlchemy
3 from flask.ext.login import LoginManager
4
5 db_sist = 'postgres://usuario:contraseña@basededatos:5432/monitoreo'
6
7 #INICIO LOGIN
8 app = Flask(__name__)
9 app.config['SECRET_KEY'] = 'dklfajdsfnlnfwejl'
10 login_manager = LoginManager()
11 login_manager.init_app(app)
12
13 #INICIO SQLALCHEMY
14 db = SQLAlchemy(app)
15 app.config['SQLALCHEMY_DATABASE_URI'] = db_sist
16 import HmiFlaskProject.models
17 db.create_all()
18 db.session.commit()
19
20 #INICIO VIEWS Y JSON
21 import HmiFlaskProject.views
22 import HmiFlaskProject.json
```

El código presente en el listado B-1 fue utilizado dentro del código maestro para la ejecución del servidor Web, en donde se observa la inclusión de las librerías de las herramientas Flask y SQLAlchemy.

Luego de iniciar el funcionamiento del framework, se procede a representar el tipo de base de datos a utilizar, los parámetros de identificación de la misma, y la ruta de acceso, a modo de ser utilizada para la creación de la comunicación entre el software diseñado y la base de datos. Al finalizar el código maestro para la ejecución del servidor Web, se observa los comandos de *create_all()* y *sesión_commit()*, que permiten escribir todos los cambios realizados a las clases incluidas en el desarrollo de software que representan a las tablas dentro de la base de datos del sistema. Este proceso de conexión fue replicado en el terminal maestro y en el sistema de alarmas, utilizando el mismo método explicado anteriormente.

Para la representación de las tablas dentro del desarrollo de software, se tuvo que realizar la declaración de cada una de estas en el formato utilizado por el framework SQLAlchemy, a modo de reemplazar la ejecución de peticiones por la manipulación de clases dentro del desarrollo de software en los elementos diseñados para el servidor del sistema. En el listado B-2 se puede observar la declaración de la clase relacionada a los parámetros de corriente capturados de la red de baja tensión.

Listado B-2 Declaración de tablas en formato SQLAlchemy

```

1  from HmiFlaskProject import db
2
3  class Corriente(db.Model):
4      __tablename__='corriente'
5      rtu_id = db.Column(db.Integer)
6      fecha = db.Column(db.DateTime, primary_key=True)
7      id_td = db.Column(db.Integer, db.
8                  ForeignKey('transformador.id_td'))
9      transformador= db.relationship(Transformador)
10     i_r = db.Column(db.Float)
11     i_s = db.Column(db.Float)
12     i_t = db.Column(db.Float)
13
14     def __init__(self,rtu_id,fecha,id_td,i_r,i_s,i_t):
15         self.rtu_id=rtu_id
16         self.fecha=fecha
17         self.id_td=id_td
18         self.i_r=i_r
19         self.i_s=i_s
20         self.i_t=i_t
21
22     @property
23     def serialize(self):
24         return {
25             'y' : str(self.fecha),
26             'a' : self.i_r,
27             'b' : self.i_s,
28             'c' : self.i_t
29         }

```

En el código anterior, se puede observar la declaración de la tabla dentro de la base de datos, asignándole el nombre de corriente, junto con las columnas relacionadas al número identificador del terminal remoto, la estampa de tiempo en donde fue capturado el parámetro eléctrico, la corriente trifásica y dos parámetros relacionados con el transformador en donde fue implementado el terminal remoto, a modo de caracterizar las mediciones con el lugar geográfico en donde fueron realizadas. Al iniciarse la ejecución de este proceso, estas columnas reciben la cualidad de variables dentro del desarrollo de software, junto con asignarles una sintaxis para la

entrega de la información en el formato de respuestas JSON. Este proceso de declaración de clases fue realizado para todas las tablas incluidas en la base de datos PostgreSQL, que se utilizaron para el diseño del sistema de alarmas, el terminal maestro y el servidor Web.

Para la generación de las respuestas JSON se utilizó la declaración del modo de presentar la información en la clase de cada tabla, junto con la definición de la ruta de acceso que entrega la respuesta JSON realizada por el servidor Web. En el código presentado en el listado B-3 se observa la declaración de la ruta de acceso, que realiza la petición de los valores presentes en la base de datos en relación al número de filas ingresado en la ruta de acceso y el número identificador del terminal remoto, para luego ser presentados en el formato utilizado en las respuestas JSON, que son interpretados por el código diseñado en base al lenguaje Javascript presentado en el apéndice A. En el caso específico de las armónicas de tensión y corriente, solo se utilizó el número identificador del terminal remoto dentro de la ruta de acceso, ya que la representación gráfica en el dominio de la frecuencia requiere solo la información de una iteración del sistema.

Listado B-3 Generación de respuestas JSON

```
1 @app.route('/json_energia/<int:identificador>/<int:cantidad>')
2
3 @login_required
4 def json_energia(identificador,cantidad):
5     resp = jsonify(json_list=[i.serialize for i in Energia.query.order_by(
6 Energia.fecha.desc()).filter(Energia.rtu_id==identificador).limit(cantidad)])
7     return resp
```