



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE DE CONCEPCIÓN – REY BALDUINO DE BÉLGICA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE CONCEPCIÓN

SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
MULTIPLATAFORMA

Trabajo de Titulación para optar al título
profesional de INGENIERO(A) EN EJECUCIÓN
EN CONTROL E INSTRUMENTACIÓN
INDUSTRIAL

Alumnos:

Natacha Martinez Alvarado

Diego Cisternas Venturelli

Profesor Guía:

Sr. Nelson Vásquez Concha



**CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE
MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO**

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Sistema De Gestión De Energía Eléctrica No Híbrida

Nombre del candidato(a): Natacha Jose Martinez Alberado

Carrera / Grado: Ing. Ejecucion en Control e Instrumentación Industrial

Campus: Sede Concepción Departamento: Electrónica e Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Nelson Vásquez Concha, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a)

del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

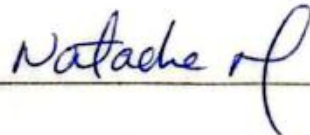
Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 30/12/2025

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 30-12-2025

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Sistema de Gestión de Energía Eléctrica Multiplataforma

Nombre del candidato(a): Diego Armando Cisternas Venturelli

Carrera / Grado: Ingeniería en Ejecución en Control e Instrumentación Industrial

Campus: Sede Concepción Departamento: Electrónica e Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Nelson Vásquez Concha, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

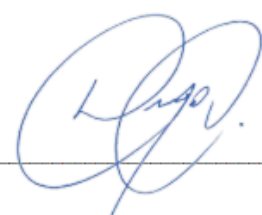
Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 30/12/2025

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 30/12/2025

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTOS

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, fuente de sabiduría y amor, cuya presencia constante me sostuvo, iluminó mis decisiones y fortaleció mi espíritu a lo largo de todo este proceso. En la fe encontré la calma, la esperanza y la convicción necesaria para perseverar.

A mi familia, base fundamental de mi vida, por su amor incondicional y apoyo permanente. En especial, a mis padres, Carmen y Moisés, por sus oraciones, enseñanzas, valores y ejemplo de vida, que han guiado mi formación personal y profesional.

A mis hijas, Ania y Valerick, principales motivos y la fuerza que impulsó cada esfuerzo realizado. Por su paciencia, amor y comprensión en los momentos de ausencia. Este logro forma parte del ejemplo, valores y principios que quiero dejarles.

A mi esposo, Angel, compañero de vida y apoyo incondicional, por creer en mí, motivarme y acompañarme con amor, paciencia, sabiduría y comprensión. Siendo un pilar tanto emocional como profesional durante este camino.

A mi compañero de tesis, Diego, por el trabajo en equipo, el compromiso mutuo y el respeto demostrado a lo largo de este proceso. Las diferencias y debates fortalecieron no solo este proyecto académico, sino también nuestra amistad.

A mis profesores por su guía, dedicación y formación académica, a mis compañeros por el apoyo y aprendizaje mutuo.

Finalmente, a mí misma, por aprender a confiar en mis capacidades, por sostenerme en la fe y la esperanza, por comprender que el crecimiento personal también nace del amor propio, esfuerzo y de la perseverancia diaria. Este logro representa no solo el cierre de una etapa académica, sino también un proceso de transformación y de profundo aprendizaje

Natacha Martinez Alvarado

Agradezco en primer lugar a Dios, por la fortaleza y la perseverancia otorgadas durante el desarrollo de este proceso académico.

A mi familia, por el apoyo y acompañamiento constante a lo largo de esta etapa, brindando el respaldo necesario para poder culminar este trabajo.

A mi pareja, por su apoyo permanente y por haberse convertido en un pilar fundamental, especialmente en esta etapa de inicio de nuestra vida como padres, siendo junto a nuestro hijo una importante fuente de motivación personal para alcanzar este objetivo.

Finalmente, agradezco a los profesores y compañeros de la carrera, por los conocimientos compartidos, el apoyo académico y el acompañamiento durante el proceso de formación profesional.

Diego Cisternas Venturelli

RESUMEN

El presente trabajo de título desarrolla un Sistema de Gestión de Energía Eléctrica multiplataforma, diseñado en conformidad con los lineamientos de la norma ISO 50001:2018 y en coherencia con la Ley de Eficiencia Energética N.º 21.305, basado en herramientas de software de código abierto, orientado al monitoreo, registro, almacenamiento y visualización de variables eléctricas. El sistema permite registrar la información de consumo eléctrico y de producción, generar trazabilidad de los datos y calcular indicador de desempeño energético (EnPI), específicamente la relación entre la energía consumida y la tonelada producida, facilitando el análisis del desempeño energético, la mejora continua y la toma de decisiones, en concordancia con lo establecido por la regulación nacional e internacional.

El sistema desarrollado representa una alternativa confiable, flexible, escalable y de bajo costo frente a soluciones propietarias, contribuyendo al cumplimiento normativo vigente y al fortalecimiento de la gestión eficiente de la energía en entornos industriales y comerciales.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 2

OBJETIVOS 3

 OBJETIVO GENERAL.....3

 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... 3

ALCANCE Y RESTRICCIONES 4

 ALCANCE 4

 RESTRICCIONES 4

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO..... 6

 1.1. Antecedentes y contexto histórico de la gestión energética 6

 1.2. Políticas y normativas internacionales sobre eficiencia energética 7

 1.3. Normativa chilena y marco regulatorio aplicable 8

 1.3.1. Ley 21.305..... 8

 1.3.2. Norma ISO 50001 9

 1.4. Soluciones tecnológicas existentes (estado del arte industrial) 10

 1.4.1. Siemens SIMATIC Energy Manager 10

 1.4.2. EMOAC Efficiency 11

 1.5. Fundamentos técnicos y conceptuales (marco teórico) 12

 1.5.1. Fundamentos de energía y eficiencia energética 12

 1.5.2. Automatización industrial e Industria 4.0..... 14

CAPÍTULO 2. DEFINICIÓN DE LA ARQUITECTURA GENERAL..... 21

 2.1. Arquitectura del sistema..... 21

 2.2. Topología de Red 22

 2.3. Componentes de Hardware 23

 2.3.1. Analizador de Red (EMpro EEM-MA771 Phoenix Contact)..... 23

 2.3.2. PLC MODICON M221 TM221C24R Schneider Electric..... 25

 2.3.3. Switch Ethernet no administrable Stratix 2000 / 1782-US16T 26

 2.3.4. CPU (Estación de Trabajo)..... 27

 2.4. Componentes de Software..... 28

 2.4.1. Estación de Trabajo 28

 2.4.2. Node-RED..... 29

 2.4.3. SQL Server Express 29

 2.4.4. Grafana..... 29

 2.4.5. ModScan..... 29

 2.4.6. EcoStruxure Machine Expert Basic..... 29

 2.4.7. Windows 10..... 29

 2.5. Instalación y configuración 29

2.5.1.	Configuración de Ambiente de Trabajo (Workstation)	30
2.5.2.	Instalación de Node-RED.....	30
2.5.3.	Instalación de Grafana	31
2.5.4.	Instalación de ModScan	32
2.5.5.	Instalación de SQL y Management Studio	33
2.5.6.	Instalación de Machine Expert Basic y Configuración de PLC MODICON M221	35
2.5.7.	Conexión y Configuración de Analizador de Red Empro	36
2.5.8.	Conexión eléctrica general del sistema.....	39
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL BACKEND DEL SISTEMA		40
3.1.	Arquitectura del Backend.....	40
3.2.	Adquisición de Datos desde el Analizador de Red	41
3.2.1.	Validación de registros Modbus mediante ModScan	41
3.2.2.	Lectura de registros mediante nodo Modbus Read en Node-RED	43
3.2.3.	Decodificación de la trama Modbus mediante Buffer Parser en Node-RED	44
3.2.4.	Procesamiento y Normalización de Registros Modbus mediante Nodo Function.....	45
3.2.5.	Validación visual preliminar de las señales.....	47
3.2.6.	Vista general del flujo completo de adquisición y procesamiento	47
3.3.	Integración con la base de datos SQL Server Express	48
3.3.1.	Configuración de la base de datos del SGEN.....	49
3.3.2.	Configuración de la conexión MSSQL en Node-RED.....	55
3.4.	Integración con PLC Modicon M221.....	61
3.4.1.	Programación de alarmas en el PLC y envío a Node-RED	61
3.4.2.	Simulación Productiva y Cálculo del ENPI	82
CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL FRONTEND DEL SISTEMA		92
4.1.	Conexión de Grafana con la base de datos SQL Server	92
4.2.	Construcción del dashboard energético en Grafana	93
4.2.1.	Sección de variables eléctricas instantáneas.....	94
4.2.2.	Sección de producción mensual, energía mensual y ENPI.....	96
4.2.3.	Sección de registro de alarmas	98
4.3.	Validación del Dashboard del Sistema.....	100
CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SGEN		101
5.1.	Inversión Inicial	101
5.2.	Ahorros energéticos proyectados	101
5.3.	Flujo de Caja del Proyecto	102
5.3.1.	Indicadores obtenidos.....	103
CAPÍTULO 6. VALIDACIÓN DE DATOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO		104
6.1.	Validación de datos adquiridos y visualizados.....	104
6.2.	Validación del almacenamiento y trazabilidad de los datos.....	105

6.3. Validación de indicadores energéticos y del EnPI mensual 107

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES 109

7.1. Recomendaciones Generales..... 111

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 114

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1.1 – Simatic MindSphere 10

Imagen 1.2 – Comparación Soluciones Simatic Energy Manager 11

Imagen 2.1 – Pirámide de Automatización 22

Imagen 2.2 – Topología de Red 22

Imagen 2.3 - Analizador de Red Phoenix Contact 24

Imagen 2.4 - PLC Modicom M221 25

Imagen 2.5 - Switch Stratix 2000 27

Imagen 2.6 – Especificaciones Work Station..... 28

Imagen 2.7 - Instalación Node Red 30

Imagen 2.8 - Node.js 30

Imagen 2.9 – Vista General de Node Red en LocalHost..... 31

Imagen 2.10 - Instalación Grafana 31

Imagen 2.11- Vista General de Grafana 32

Imagen 2.12 - Vista general de la interfaz del software Open ModScan 32

Imagen 2.13- Instalación SQL 33

Imagen 2.14 - Instalación SQL Server Configuration 33

Imagen 2.15- Instalación SQL Management Studio inicio 34

Imagen 2.16 - Instalación SQL Management Studio final 34

Imagen 2.17- Vista General de SQL Management Studio 34

Imagen 2.18 - Instalación EcoStruxure Machine Expert..... 35

Imagen 2.19 - Configuración PLC M221 36

Imagen 2.20 - Configuración de red PLC M221 36

Imagen 2.21- Diagrama Conexión Analizador de Red..... 37

Imagen 2.22 - Parámetros de comunicación de analizador de red..... 38

Imagen 2.23 - Ping a analizador de red 38

Imagen 2.24 - TDAyF 38

Imagen 2.25 - Diagrama Unilineal General de sistema..... 39

Imagen 3.1 - Arquitectura del backend 40

Imagen 3.2 - Configuración ModScan 41

Imagen 3.3 -validación de los Registros Modbus en Modscan 42

Imagen 3.4 - Config. Cliente Modbus Read 43

Imagen 3.5 - Config. Modbus Read 44

Imagen 3.6 - Configuración Buffer Parser 45

Imagen 3.7 - Function Node..... 46

Imagen 3.8 - Visualización de variables en Node Red..... 47

Imagen 3.9 - Flujo de Adquisición de datos en Node Red 48

Imagen 3.10 - Base de datos SQL 49

Imagen 3.11 - Nueva Base de Datos en SQL 50

Imagen 3.12 - Configuración Base de Datos..... 50

Imagen 3.13 - Tabla de Registros..... 51

Imagen 3.14 - Script LogSGEn 52

Imagen 3.15 - Editor de Consultas 52

Imagen 3.16 - Editor de Consultas 53

Imagen 3.17 - Visualización de Tabla..... 53

Imagen 3.18 - Propiedades del Servidor 54

Imagen 3.19 - Inicio de Sesión usuario SQL..... 54

Imagen 3.20 - Start Mode SQL Server..... 55

Imagen 3.21 - Estado de Servicios SQL..... 55

Imagen 3.22 - SQL Configuración TCP/IP	55
Imagen 3.23 - Config. Cliente MSSQL Node Red.....	56
Imagen 3.24 - MSSQL Node.....	57
Imagen 3.25 - Function Node.....	58
Imagen 3.26 - Inject node.....	59
Imagen 3.27 - Estructura General del Flujo de Registro en Base de Datos en Node-Red.....	60
Imagen 3.28 - Verificación de Consulta de Registros en Base de Dato	60
Imagen 3.29 - Function node.....	62
Imagen 3.30 - Config. Modbus Write	63
Imagen 3.31 - Propiedades Modbus Write node	63
Imagen 3.32 - Validación con ModScan	64
Imagen 3.33- Verificación de Registros en ModScan	64
Imagen 3.34 - Visualización Tabla de Animación Machine Expert.....	65
Imagen 3.35 - Nodos Modbus Write	66
Imagen 3.36 - Normalización señal FP Machine Expert.....	67
Imagen 3.37 - Lógica de Alarmas en PLC	68
Imagen 3.38 - Visualización de segmentos de alarmas en EcoStruxure Machine Expert Basic	69
Imagen 3.39 - Visualización de estados de los bits de alarmas en ModScan	69
Imagen 3.40 - Nodo Modbus.....	70
Imagen 3.41 - Config. Nodo Modbus.....	71
Imagen 3.42 - Nodo Buffer Parser	72
Imagen 3.43 - Nodo Function	73
Imagen 3.44 - Código Alarmas I.....	74
Imagen 3.45 - Código Alarmas II.....	75
Imagen 3.46 - Flujo Node Red - SQL	76
Imagen 3.47 - Log Alarmas SQL	77
Imagen 3.48 - Function Mensajería Alarmas I.....	79
Imagen 3.49 - Function Mensajería Alarmas II.....	79
Imagen 3.50 - Nodo de transporte SMTP.....	80
Imagen 3.51 - Nodo de transporte SMTP II.....	81
Imagen 3.52 – Flujo SMTP Node Red	82
Imagen 3.53 - Lógica Simulación Producción	83
Imagen 3.54 - Nodo Modbus Read	84
Imagen 3.55 - Código Function Producción Node Red.....	85
Imagen 3.56 - Flujo Producción Acumulada Node Red.....	86
Imagen 3.57 - Modbus Read	86
Imagen 3.58 - Código Nodo Function Indicador Energía I.....	88
Imagen 3.59 - Código Nodo Function Indicador Energía II.....	89
Imagen 3.60 – Código de Construcción de Consulta SQL en Node-Red.....	90
Imagen 3.61 - Configuración Nodo MSSQL	90
Imagen 3.62 – Tabla del Log SQL Variables Producción EnPi	91
Imagen 4.1 - Config MSSQL en Grafana.....	92
Imagen 4.2 - TCP Dynamic Ports	93
Imagen 4.3 – Visualización de la Interfaz de Usuario del SGen en Grafana	94
Imagen 4.4 – Visualización de las Variables Eléctricas Instantáneas	94
Imagen 4.5 - Indicadores de Producción y ENPI	96
Imagen 4.6 – Visualización del Log de Alarmas en Grafana	98
Imagen 6.1- Visualización de Valores Instantáneos Web Server Phoenix Contact	105
Imagen 6.2 - Visualización de Valores Instantáneos en Node Red	105

Imagen 6.3 - Visualización de Valores Instantáneos en Grafana 105

Imagen 6.4 - Visualización de Consulta SQL con fecha, hora y variables..... 106

Imagen 6.5 - Visualización de Interfaz de Usuario para un mismo instante de tiempo en Grafana 106

Imagen 6.6 - LogEnpi 108

Imagen 6.7 - Contador Energía EMPRO..... 108

Imagen 6.8 - Dashboard Enpi..... 108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1- Especificaciones técnicas del Analizador de Red Phoenix Contact EEM-MA771 24

Tabla 2.2- Especificaciones técnicas del PLCM221 25

Tabla 2.3 - Especificaciones técnicas Stratix 2000 27

Tabla 3.1 - Registros Modbus de parámetros Eléctricos del Sistema..... 42

Tabla 3.2 - Dirección Modbus de Variables Eléctricas 65

Tabla 5.1 - Inversión Inicial 101

Tabla 5.2 - Flujo de Caja..... 102

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la eficiencia energética es fundamental para que cualquier organización sea sostenible y competitiva. En Chile, la reciente Ley 21.305 de Eficiencia Energética, promulgada en 2021, ya no lo deja a la libre elección, sino que obliga a los grandes consumidores a gestionar activamente su energía.

Para enfrentar este desafío, la norma ISO 50001:2018 funciona como una hoja de ruta, ayudando a las empresas a ordenar sus procesos, identificar dónde se consume más energía y, lo más importante, a mejorar continuamente.

El presente proyecto nace justo en esta intersección: donde se busca crear un sistema de gestión de energía usando software de código abierto. La idea es registrar los datos de un analizador de red y un PLC usando una base de datos SQL y generar la comunicación a través de herramientas de la industria 4.0. Además, contar con un entorno visual, donde el usuario final podrá acceder a indicadores claves para la gestión de energía, tales como, kWh, factor de potencia, voltaje, corriente, THD, así como también la relación de kWh por unidad de medida productiva (ejemplos: ton/h, kg/h, m/h, cajas/h, etc).

Esta aplicación permite a los usuarios finales cumplir con la normativa vigente, debido a que hace una integración de la medición y registro continuo de variables energéticas, en este caso eléctricas, según lo establecido en la ley 21.305. Además, facilita una interfaz visual para el monitoreo, seguimiento, análisis y toma de decisiones a través de gráficos, tablas dinámicas e indicadores de desempeño energético y reportabilidad, en conformidad con la norma ISO 50001. De esta manera los usuarios podrán utilizar la data proporcionada para generar estudios de eficiencia energética y la mejora continua.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, grandes y medianas empresas no cuentan con un registro y reportabilidad de sus consumos eléctricos. En la mayoría de los casos, este proceso se realiza de forma manual, utilizando formularios en papel o planillas Excel, lo que dificulta el análisis eficiente y la trazabilidad de los parámetros energéticos.

Uno de los factores que limita la implementación de soluciones más avanzadas es el alto costo de los Sistemas de Gestión de la Energía (SGEn) disponibles en el mercado, los cuales requieren una inversión significativa que resulta inaccesible para muchas organizaciones, representando una barrera para empresas que no cuentan con los recursos suficientes para invertir en tecnología especializada. Las empresas, en su búsqueda constante por optimizar recursos y maximizar la producción, requieren conocer con precisión todos los costos asociados a la fabricación de sus productos. No obstante, el consumo energético es un componente crítico de los costos de producción; su desconocimiento limita la capacidad de las empresas para poder implementar la mejora continua y decisiones estratégicas, basadas en datos confiables y actualizados sobre el uso de la energía y los niveles de producción.

En este contexto, la regulación vigente respalda la necesidad de contar con un SGEn, la Ley 21.305 sobre Eficiencia Energética en Chile establece que los grandes consumidores con Capacidad de Gestión de la Energía (CCGE), deben contar con la implementación de un Sistema de Gestión de la Energía certificado bajo la norma ISO 50001. El artículo 2° de la presente ley menciona: “todas aquellas empresas que hayan tenido durante el año calendario anterior un consumo energético total para uso final igual o superior a 50 tera-calorías deberán reportar anualmente al Ministerio de Energía sus consumos por uso de energía y su intensidad energética del año calendario anterior.” (Ley 21.305, 2021).

A su vez, la Norma ISO 50001:2018 establece un marco internacional reconocido y menciona: “Este documento especifica los requisitos para establecer, implementar, mantener y mejorar un sistema de gestión energética (SGEn). El resultado previsto es permitir que una organización adopte un enfoque sistemático para lograr la mejora continua del desempeño energético y del SGEn.” (ISO 50001:2018, Apartado 1, Scope).

De esta manera, incorporar la sostenibilidad como parte del modelo de negocio no solo mejora la imagen corporativa, sino que también fortalece la resiliencia frente a cambios del entorno. En este contexto, implementar un Sistema de Gestión de la Energía (SGEn) flexible, accesible y multiplataforma deja de ser una limitante, convirtiéndose en una herramienta fundamental para optimizar recursos, reducir costos y anticiparse a futuras exigencias del mercado y la regulación.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema multiplataforma de gestión de energía eléctrica basado en software de código abierto, orientado al monitoreo, visualización y análisis de variables eléctricas y de proceso, con el fin de apoyar el cumplimiento de la Ley de Eficiencia Energética y los principios de la norma ISO 50001.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. **Definición de la arquitectura general del sistema**, incluyendo hardware, software, protocolos de comunicación a utilizar y preparación de la infraestructura de red.
2. **Configuración y desarrollo de backend**, estableciendo la comunicación usando protocolo Modbus TCP entre Gateway NodeRed, analizador de red y PLC. Incluyendo lógica de control para la gestión de alarmas y simulación en el PLC, el diseño de flujos de integración y el enlace entre el Gateway y la base de datos en SQL Server Express, además de la configuración de tablas y procedimientos almacenados.
3. **Configuración y desarrollo del Frontend**, mediante la implementación de la interfaz de usuario en Grafana para la visualización en tiempo real de variables eléctricas, tendencias, producción acumulada y energía consumida, e incorporación del Indicador de Desempeño Energético (EnPi, kWh/ton).
4. **Realizar pruebas de funcionamiento y validación del sistema**, garantizando confiabilidad en la adquisición, procesamiento y visualización de datos, KPI's, entre otros.

ALCANCE Y RESTRICCIONES

ALCANCE

El alcance del proyecto contempla el diseño, configuración e implementación de un sistema de gestión de energía eléctrica multiplataforma, usando herramientas de software de código abierto. Se considera la configuración de la capa de backend y frontend.

En la capa de backend se desarrolla la comunicación y configuración desde los instrumentos de terreno (analizador de red y PLC) a través del gateway Node-Red y el protocolo Modbus TCP/IP hasta la base de datos SQL Server Express, donde están las tablas y procedimientos almacenados para gestionar la información. También se realiza la programación de alarmas y simulación de producción en el PLC, esto con el fin de informar de manera oportuna las desviaciones o parámetros fuera de rango.

En la capa de Frontend se implementa el diseño y configuración de dashboards usando Grafana, para visualizar en tiempo real las variables eléctricas, toneladas acumuladas, consumo energético e indicador correspondiente a eficiencia energética (EnPi), así como también la configuración y creación de tendencias históricas, para analizar y realizar seguimiento de la información almacenada en la base de datos SQL.

Por consiguiente, este proyecto abarca desde la adquisición de los datos hasta su procesamiento, almacenamiento y visualización, proporcionando una herramienta integral que contribuya al cumplimiento de la ley 21.305 y facilite la aplicación de la norma ISO 50001.

RESTRICCIONES

El presente sistema de gestión de energía sólo se enfoca en el registro y visualización de parámetros de energía eléctrica.

Para mantener el proyecto enfocado y viable, es importante tener en cuenta las siguientes limitaciones:

El software se limita estrictamente a herramientas gratuitas o con licencias académicas, sin recurrir a software propietario.

Toda prueba e implementación se realiza en un ambiente de laboratorio controlado, no en una planta industrial en operación. El indicador clave de desempeño (Enpi) se realiza mediante una simulación del acumulado de la unidad de producción(ton) respecto al consumo de energía(kwh).

El modelo de datos se centra exclusivamente en las mediciones del analizador de red.

En el almacenamiento de la data se utiliza SQL Server Express, lo que implica una limitación de 10 GB.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes y contexto histórico de la gestión energética

La gestión de la energía y la mejora de la eficiencia energética han sido importantes durante mucho tiempo para la industria y comercio. En la década de 1790, las máquinas de vapor de Boulton y Watt produjeron una ventaja competitiva porque eran más eficientes en el consumo de combustible y, de hecho, cobraron una parte del ahorro en el coste del combustible de una manera similar a los contratos de rendimiento energético actuales. En la Segunda Guerra Mundial, la eficiencia del combustible se volvió vital para el esfuerzo bélico y se creó el Servicio Nacional de Eficiencia del Combustible Industrial para asesorar a la industria sobre medidas de ahorro energético, ya que la escasez de combustible continuó en los años de la posguerra. Sin embargo, la gestión de la energía como disciplina independiente comenzó a evolucionar después de la primera crisis del petróleo de 1973 y realmente entró en vigor después de la segunda crisis del petróleo de 1979, cuando los precios reales de la energía aumentaron drásticamente.

Actualmente, los gobiernos han reconocido que gestionar el consumo de energía de manera eficiente es clave para reducir emisiones, mejorar la competitividad industrial y garantizar la sostenibilidad del desarrollo. Como resultado, cada vez más naciones han implementado leyes, regulaciones y normativas que establecen estándares mínimos, incentivos y obligaciones para las empresas. La implementación de un Sistema de Gestión de Energía basado en eficiencia energética ha pasado de ser una recomendación para convertirse en una obligación legal en distintas regiones, debido su impacto en la economía global.

Desde este punto de vista energético y productivo caracterizado por la creciente demanda, los costos de la electricidad y la presión normativa en materia de sostenibilidad, los estudios y desarrollos tecnológicos en sistemas de gestión de energía han adquirido un rol protagónico. Estos antecedentes permiten comprender cómo políticas públicas y regulaciones a nivel global sobre eficiencia energética impactan en la eficiencia operativa y la competitividad de las organizaciones.

En general, estas políticas buscan transformar las prácticas industriales hacia modelos más sostenibles y eficientes, contribuyendo significativamente a la reducción de emisiones y al desarrollo sostenible. La mayoría de las políticas relacionadas con el uso eficiente de la energía son particularmente ambiciosas y relevantes para la industria debido a:

- **Estándares Obligatorios:** La implementación de requisitos mínimos de eficiencia energética obliga a las industrias a adoptar tecnologías y prácticas más eficientes.
- **Auditorías y Gestión Energética:** La exigencia de auditorías energéticas y la promoción de sistemas de gestión energética impulsan a las empresas a monitorear y optimizar su consumo energético.

- Incentivos y Financiamiento: Programas como PROCEL en Brasil ofrecen financiamiento y apoyo técnico para proyectos de eficiencia energética en el sector industrial.
- Metas de Reducción de Emisiones: Iniciativas como el Pacto Verde Europeo establecen objetivos claros de reducción de emisiones, incentivando a las industrias a innovar y mejorar su eficiencia energética.

1.2. Políticas y normativas internacionales sobre eficiencia energética

A partir de la revisión de normativas más relevantes a nivel mundial, se pueden identificar varios elementos clave que se repiten en las leyes y políticas de eficiencia energética. Estos puntos en común reflejan un esfuerzo global por optimizar el uso de la energía, reducir emisiones y mejorar la competitividad económica.

Muchas regulaciones establecen obligaciones para grandes consumidores de energía (industrias, comercios y edificios públicos) para que implementen sistemas de gestión energética, exigiendo auditorías periódicas, reportes de consumo y metas de reducción de energía. La ISO 50001 ha sido adoptada por empresas e industrias de todo el mundo como una herramienta para cumplir con las regulaciones de eficiencia energética. Incluyendo beneficios como; estructuración estándar para la gestión de la energía; facilitación del cumplimiento de normativas al ordenar los procesos con requisitos gubernamentales; reducir costos operativos, mejorar la competitividad, optimizar el uso de energía y minimizar el impacto ambiental.

A nivel mundial las políticas actuales más importantes que se alinean con el estándar de la norma ISO-50001 son:

- Pacto Verde Europeo: Aprobado en 2019, este conjunto de iniciativas busca que Europa sea climáticamente neutra para 2050. Incluye estrategias como el “Plan de Acción de Economía Circular” y la “Estrategia de Integración del Sistema Energético”, que promueven la eficiencia energética en la industria y otros sectores.
- Directiva de Eficiencia Energética (2012/27/UE): Establece medidas vinculantes para que la Unión Europea alcance sus objetivos de eficiencia energética, incluyendo auditorías energéticas obligatorias para grandes empresas y la promoción de sistemas de gestión de la energía en la industria.
- Brasil: Implementó la Ley N°10.295 en 2001, que establece políticas nacionales para la conservación y el uso racional de la energía, incluyendo estándares mínimos de eficiencia energética para equipos y edificios.
- Costa Rica: La Ley N° 7447 de 1994 regula el uso racional de la energía, estableciendo disposiciones para promover la eficiencia energética en el país.
- Panamá: La Ley N° 69 de 2012 establece los lineamientos generales de la política nacional para el uso racional y eficiente de la energía.

- Canadá: Ha establecido regulaciones para mejorar la eficiencia energética en edificios, industrias y transporte, alineándose con sus compromisos climáticos internacionales.
- Chile: Ley de Eficiencia Energética Ley N° 21.305, promulgada en febrero de 2021. Promueve la gestión eficiente de la energía en diversos sectores, incluyendo la industria, el transporte y la construcción, estableciendo estándares y metas específicas para reducir el consumo energético.

1.3. Normativa chilena y marco regulatorio aplicable

Actualmente, en Chile (Ley 21.305) se obliga a grandes consumidores a implementar sistemas de gestión de energía, por ende, deben registrar su consumo y mejorar su eficiencia. Además, establece auditorías periódicas y reportes de consumo obligatorio, buscando institucionalizar la eficiencia energética como política pública para alcanzar la meta de carbono neutralidad 2050. El cual es un compromiso global, ratificado por países como Chile y la Unión Europea, para equilibrar las emisiones de gases de efecto invernadero y eliminarlas por completo para el año 2050.

1.3.1. Ley 21.305

La presente ley tiene por objeto elaborar el Primer Plan Nacional de Eficiencia Energética, que se irá renovando cada cinco años, estará a cargo del Ministerio de Energía en conjunto con otros ministerios y contará con participación ciudadana. Estará regulado por un reglamento y será sometido al consejo de ministros para la sustentabilidad, en un plazo no superior a 18 meses de publicada esta ley.

El plan deberá contemplar una meta de reducción de intensidad energética de, al menos, de un 10% al 2030, respecto al 2019. Adicionalmente, dicho plan deberá contemplar una meta para los consumidores con capacidad de gestión de energía consistente en la reducción de su intensidad energética de al menos un 4% promedio en su período de vigencia.

Este cuerpo normativo, en su artículo 2°, establece que se creará un listado de Consumidores con Capacidad de Gestión de Energía para aquellas empresas que consuman igual o superior a 50 tera-calorías anuales. Las empresas que se encuentren en este listado, en un plazo determinado por la ley, deberán implementar un Sistema de Gestión de Energía que cubra al menos un 80% del consumo energético total, el que posteriormente será auditado por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles.

En tanto, el artículo 3° de la ley estipula que las viviendas, edificios de uso público, edificios comerciales y edificios de oficinas deberán contar con una calificación energética para obtener la recepción final o definitiva por parte de la Dirección de Obras Municipales respectiva. Para estos efectos se otorgará una etiqueta de eficiencia

energética, la que tendrá por finalidad informar respecto de la eficiencia energética de las edificaciones, la que deberá incluirse en toda publicidad de venta que realicen las empresas constructoras e inmobiliarias. Para efectos de la aplicación de la calificación energética se crea el “Registro Nacional de Evaluadores Energéticos”, a cargo del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

Igualmente, las municipalidades, gobiernos regionales, instituciones públicas, los distintos poderes del Estado y Fuerzas Armadas y de Orden deberán velar por el buen uso de la energía en los inmuebles que ocupen o administren a cualquier título y deberán publicar periódicamente el detalle de consumo energético.

En otras materias, el artículo 6° de esta norma dispone Ministerio de Energía regulará la interoperabilidad del sistema de recarga de vehículos eléctricos.

Por otra parte, por medio de esta ley se modifica el Decreto Ley N° 2.224, de 1978, del Ministerio de Energía, con tal de incluir al hidrógeno y combustibles a partir de hidrógeno dentro de las competencias en el sector energía de este Ministerio; y se agregan nuevos párrafos referidos a los nuevos estándares de eficiencia energética.

Finalmente, en el artículo 8° de este cuerpo legal, se dispone que cuando se trate de vehículos que no generen emisiones contaminantes (eléctricos o híbridos con recarga eléctrica exterior), durante los diez años siguientes a la entrada en vigencia de la presente ley, el director o directores regionales del Servicio de Impuestos Internos estarán facultados para establecer vidas útil de tres años para vida útil para los vehículos citados para efectos de la aplicación del régimen de depreciación normal o acelerada.

1.3.2. Norma ISO 50001

La norma ISO 50001:2018 es una norma internacional que proporciona un marco para establecer, implementar, mantener y mejorar un Sistema de Gestión Energética (SGEn). Su objetivo es ayudar a las organizaciones a mejorar su desempeño energético, incluyendo la eficiencia, el uso y el consumo energético, mediante un enfoque sistemático.

La norma es aplicable a organizaciones de todo tipo y tamaño, independientemente de su contexto geográfico, cultural o social. Está diseñada para ser compatible con otras normas ISO de sistemas de gestión y sigue el modelo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA) para la mejora continua.

La norma ISO 50001 se basa en el modelo de sistema de gestión de mejora continua, utilizado también por otras normas reconocidas como ISO 9001 o ISO 14001. Esto facilita a las organizaciones la integración de la gestión energética en sus esfuerzos globales por mejorar la calidad y la gestión ambiental.

La norma ISO 50001 proporciona un marco de requisitos para que las organizaciones puedan:

- Desarrollar una política para un uso más eficiente de la energía
- Fijar metas y objetivos para cumplir la política

- Utilizar datos para comprender mejor y tomar decisiones sobre el uso de energía
- Medir los resultados
- Evaluar la eficacia de la política y promover la mejora continua de la eficiencia energética.

1.4. Soluciones tecnológicas existentes (estado del arte industrial)

Actualmente, en el mercado existen algunos softwares para la gestión de la energía desarrollados por grandes fabricantes y proveedores de tecnologías como Siemens. Sin embargo, nuevas empresas como Emoac, una empresa nacional chilena, filial de Copec S.A también ofrece un software basado en gestión y asesoría energética, pero todos principalmente dominados por soluciones propietarias y altos costos pre y post implementación. Estas plataformas cuentan con amplia documentación y se posicionan como referentes en la implementación de sistemas de gestión energética en entornos industriales.

1.4.1. Siemens SIMATIC Energy Manager

Es una solución para la gestión energética industrial, disponible tanto como aplicación en la nube (MindSphere App) como en modalidad On-Premise. SIMATIC Energy Manager es la plataforma de Siemens para la gestión integral de energía industrial, orientada a aportar transparencia y eficiencia desde el nivel de máquina hasta el nivel corporativo. Su uso está alineado con la norma ISO 50001, permitiendo cumplir requisitos legales, reducir costos energéticos y mejorar la sostenibilidad empresarial.

Versión plataforma IoT MindSphere (cloud app):

Diseñada para gerentes de energía globales y operadores de planta que requieren acceso remoto. Gracias a la tecnología en la nube, permite acceso y escalabilidad extendido(a) desde cualquier lugar, reduciendo el esfuerzo de ingeniería mediante análisis predefinidos. Los datos pueden integrarse con otras aplicaciones dentro del ecosistema de MindSphere.

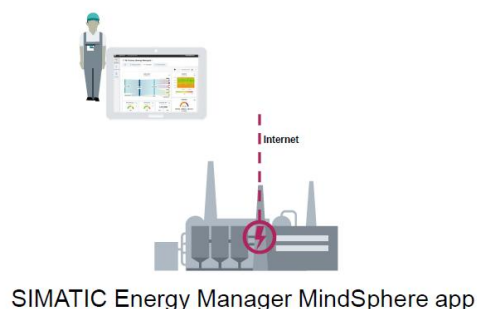


Imagen 1.1 – Simatic MindSphere

Versión On-Premise:

Orientada a responsables de energía locales y operadores de planta. Combina adquisición de datos, almacenamiento y análisis en una misma interfaz de usuario, con escalabilidad

desde nivel máquina hasta nivel planta (incluso en múltiples sitios). Incorpora funcionalidades avanzadas como: Gestión de líneas base, reducción de consumo, reportes flexibles, análisis por lotes (batch analysis), recolección manual de datos. En esta modalidad, los datos permanecen dentro de la propia planta/fábrica, lo que refuerza la seguridad y la soberanía de la información.

Modelo Comercial

La solución no se adquiere como software libre, sino bajo un esquema de licenciamiento vinculado a la cantidad de puntos de conexión (analizadores de red).

Por ejemplo, en el caso de Energy Manager On Premise:

Para la implementación de la adquisición y gestión de la data de 5 analizadores de red (no incluye analizadores de red) tiene un costo aproximado de \$5.000.000 CLP, lo que incluye la licencia del software por 3 años. Tras este período, se debe renovar la licencia para seguir utilizando la plataforma.

En síntesis, SIMATIC Energy Manager ofrece un sistema completo para monitoreo, análisis, predicción y optimización del consumo energético, adaptándose a distintas necesidades: conectividad global mediante la nube o independencia y control local mediante soluciones on-premise.

No obstante, las especificaciones señalan que su implementación requiere altos costos de licenciamiento y una infraestructura tecnológica un tanto homogénea, lo que limita la flexibilidad y la adopción.

SIMATIC Energy Manager comparación funcional

MindSphere app & On-premise solution

	MindSphere app	On-premise solution
Counter (Meter) Management	✓	✓
KPI Calculation	✓	✓
Dashboard	✓	✓
Reporting	✗	✓
Batch analysis	✗	✓*
Baseline Management	✗	✓*
Prediction functionality	✗	✓*
Extended authority concept	✗	✓*
Manual data collection	✗	✓
Out-of-the-box media analysis	✓	✗

*) Functionality available in PRO version only

SIEMENS

Page 49

Unrestricted | © Siemens 2022 | Food & Beverage

Imagen 1.2 – Comparación Soluciones Simatic Energy Manager

1.4.2. EMOAC Efficiency

EMOAC Efficiency: Plataforma integral de gestión energética

El servicio EMOAC Efficiency, desarrollado por la empresa COPEC, representa una propuesta integral orientada a la optimización del uso de la energía en organizaciones industriales y de servicios. Su propósito principal es facilitar la implementación de Sistemas de Gestión de Energía (SGE) conforme a la norma ISO 50001:2018,

promoviendo un enfoque sistemático para la mejora continua del desempeño energético y el cumplimiento de la Ley 21.305 de Eficiencia Energética.

La solución se estructura sobre tres ejes: eficiencia energética, gestión continua y tecnologías aplicadas. A través de estos componentes, EMOAC Efficiency combina asesoría técnica especializada con herramientas digitales que permiten registrar, analizar y controlar los consumos energéticos de manera centralizada. Su plataforma digital, denominada EMOAC Technology, posibilita la digitalización de procesos energéticos, el seguimiento de indicadores de desempeño, la administración de facturación y la detección temprana de desviaciones o ineficiencias operativas.

El modelo de trabajo propuesto por EMOAC considera distintas etapas: análisis de brechas, planificación energética, diseño documental, operación y validación, que permiten al cliente desarrollar capacidades internas para mantener un sistema sostenible en el tiempo. Asimismo, incorpora un componente denominado Gestión Continua, mediante el cual se capturan y visualizan datos en tiempo real provenientes de múltiples sensores y sistemas de medición, favoreciendo la trazabilidad, la toma de decisiones basada en datos y la identificación de oportunidades de mejora.

Desde el punto de vista económico, el servicio se ofrece bajo una estructura de cobro por proyecto con un valor total estimado de 1.102 UF, a pagar en 12 cuotas mensuales durante el periodo de implementación. La primera cuota asciende a 92 UF, mientras que las once restantes tienen un valor de 90 UF cada una, pudiendo adicionarse los costos de visitas técnicas y de certificación externa (aproximadamente 200 UF). Esta modalidad busca facilitar la planificación financiera del cliente y asegurar un acompañamiento técnico sostenido a lo largo del proceso de implementación del SGE

En conjunto, el enfoque de EMOAC Efficiency ofrece a las empresas una herramienta de apoyo técnico y estratégico para reducir sus consumos, optimizar recursos y fortalecer su desempeño ambiental, convirtiéndose en un actor relevante dentro del mercado chileno de soluciones para la gestión energética industrial. En síntesis, Emoac se ofrece como gestor energético.

1.5. Fundamentos técnicos y conceptuales (marco teórico)

En este apartado se abordan los conceptos técnicos y teóricos que sustentan la gestión energética en entornos industriales. Se presentan los fundamentos asociados a la energía y la eficiencia, junto con los principios de automatización y digitalización que permiten la implementación de sistemas modernos de monitoreo y control energético.

1.5.1. Fundamentos de energía y eficiencia energética

La energía eléctrica es una forma versátil de energía empleada en la mayoría de los procesos industriales, cuyo comportamiento depende de parámetros como la tensión, la

corriente, la potencia activa y el factor de potencia (IEEE, 2014). Un bajo factor de potencia o una elevada distorsión armónica total (THD) generan pérdidas y reducen la eficiencia del sistema, por ende, impactan directamente en la calidad de la energía.

La eficiencia energética, de acuerdo con la norma ISO 50001:2018, corresponde a la relación entre la energía utilizada y el resultado obtenido. Esta norma promueve la implementación de un Sistema de Gestión de la Energía (SGEn) basado en el ciclo PHVA (Planificar–Hacer–Verificar–Actuar), que permite establecer una línea base energética (EnB), definir indicadores de desempeño (EnPI) y priorizar usos significativos de energía (USE) (ISO, 2018).

La aplicación de un SGEn requiere medición y monitoreo continuo, elementos esenciales para la mejora del desempeño energético, puesto que, la gestión moderna se basa en el principio de que la medición es un requisito previo para el control. Esta idea, popularizada por Peter Drucker en su concepto de “Gestión por Objetivos” (1954), se resume frecuentemente en el axioma: 'lo que no se mide, no se puede gestionar'. En este contexto, la digitalización emerge como una herramienta clave para optimizar el uso de la energía y facilitar decisiones basadas en datos.

Definiciones:

- **Energía:** La energía es la capacidad que posee un cuerpo o sistema para realizar trabajo o provocar cambios en otro sistema.
- **Energía eléctrica:** Es la forma de energía que se manifiesta por el flujo de cargas eléctricas a través de un conductor, lo que permite su conversión en otros tipos de energía como térmica, mecánica o luminosa.
- **Tensión (voltaje):** Es la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos de un circuito, que impulsa el movimiento de las cargas, medida en voltios (V).
- **Corriente eléctrica:** Es el flujo de cargas eléctricas que circulan a través de un conductor, normalmente medido en amperios (A).
- **Potencia eléctrica:** Es la velocidad a la que se transfiere energía eléctrica en un circuito. Se mide en watts (W) y representa la cantidad de energía que un dispositivo consume o genera por unidad de tiempo.
- **Factor de potencia (F.P.):** Se define el factor existente entre potencia activa (P) y potencia aparente (S). Tanto matemáticamente como conceptualmente se desprende que el factor de potencia posee el mismo valor que el coseno de ϕ , sin embargo, esto sólo es cierto para cargas lineales. Cuando se trabaja con cargas no lineales (variadores de frecuencia, fuentes de alimentación conmutadas, etc.) aparece una componente de corrientes no senoidales (armónicas) que provocan que no exista una relación matemática lineal entre la corriente y la tensión. Estos componentes armónicos inciden directamente en la potencia aparente de la carga y por tanto deben tenerse en cuenta a la hora de calcularla.
- **Distorsión armónica total (THD):** La distorsión armónica total (THD) es la relación entre el componente armónico total y el componente fundamental. Se

expresa mediante la siguiente fórmula de cálculo: el numerador es la suma de los valores RMS de cada orden, comenzando por el segundo. El denominador es el valor RMS de la forma de onda fundamental.

- Eficiencia energética: Proporción u otra relación cuantitativa entre un resultado de desempeño, servicio, productos, materias primas, o de energía y una entrada de energía (3.5.3 ISO 50001:2018).
- SGE: Sistema de gestión para establecer una política energética, objetivos, unas metas energéticas, planes de acción y procesos para alcanzar los objetivos y las metas energéticas (3.2.2 ISO 50001:2018).
- USE / SEU: Usos Significativos de la Energía, Usos de la energía que representan un consumo de energía sustancial y/o que ofrecen un potencial considerable para la mejora del desempeño energético (3.5.6 ISO 50001:2018).
- (EnB / LBE): Línea Base Energética, Referencia cuantitativa que proporciona la base para la comparación del desempeño energético (3.4.7 ISO 50001:2018).
- (EnPi/IDE): Indicador de Desempeño Energético, Medida o unidad de desempeño energético, según lo define la organización (3.4.4 ISO 50001:2018).

1.5.2. Automatización industrial e Industria 4.0

La palabra automatización viene del griego antiguo: “auto” significa “por sí mismo” y “matos” significa “movimiento”. Por tanto, automatizar significa hacer que algo se mueva o funcione solo, sin la intervención constante de personas. En comparación con métodos manuales, los sistemas automatizados logran mejores resultados, son más rápidos, precisos y potentes, asegurando así procesos industriales más eficientes y seguros. Dentro de la automatización industrial se controlan distintas variables de proceso, como temperatura, presión, caudal, distancia o niveles de líquidos, etc. Estas variables se detectan, analizan y gestionan al mismo tiempo mediante equipos inteligentes llamados controladores o microprocesadores. Para hacerlo posible, estos sistemas necesitan componentes específicos de hardware (máquinas y sensores) y software (programas de control y supervisión).

La automatización de los procesos productivos es uno de los aspectos que más ha evolucionado en la industria desde sus comienzos. La integración de tecnologías clásicas como la mecánica y la electricidad con otras más modernas (electrónica, informática, telecomunicaciones, etc.) está haciendo posible esta evolución.

Esta integración de tecnologías queda representada en la llamada "pirámide de automatización", que estructura los cinco niveles tecnológicos que se pueden encontrar en un entorno industrial. Las tecnologías se relacionan entre sí, tanto dentro de cada nivel como entre los distintos niveles a través de los diferentes estándares de comunicaciones industriales.

La pirámide de automatización proporciona un esquema muy visual para comprender

mejor cómo se integran los sistemas de control y automatización en una planta industrial. Se muestra a través de una jerarquía de niveles en la que cada nivel tiene su propia función y contribuye a la eficiencia, la seguridad y la productividad en el entorno industrial. La comunicación y la transferencia de datos entre estos niveles son fundamentales para el buen funcionamiento de una instalación industrial. A continuación, se describen los diferentes niveles mostrados en la pirámide de automatización:

- Nivel 1 (Campo): Incluye los dispositivos físicos presentes en la industria, como los actuadores y sensores. Estos dispositivos recopilan datos sobre el proceso productivo y controlan las acciones físicas en tiempo real.
- Nivel 2 (Control): Incluye los dispositivos controladores como ordenadores, PLCs, etc. Como su propio nombre indica, se encarga de controlar y supervisar las operaciones realizadas en el nivel de campo, procesando los datos de los sensores y tomando decisiones para controlar las acciones.
- Nivel 3 (Supervisión): Corresponde a los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA). Se encarga de supervisar y controlar diferentes procesos y áreas de una instalación industrial. Se utilizan interfaces gráficas para monitorear el estado del proceso, recibir alarmas y tomar decisiones importantes.
- Nivel 4 (Planificación): En un nivel superior se encuentran los sistemas de ejecución de manufactura (MES). Se centra en la planificación de toda la instalación industrial. Los datos recopilados de los anteriores niveles se utilizan para la toma de decisiones estratégicas como la programación de la producción o el mantenimiento preventivo.
- Nivel 5 (Gestión): La cúspide de la pirámide la componen los sistemas de gestión integral de la empresa (ERP, SAP). La toma de decisiones en la que se centra es de nivel corporativo para la gestión global de la empresa.

En el marco de la Industria 4.0, esta estructura ha evolucionado hacia un modelo más flexible y conectado, donde se produce la integración entre las tecnologías operativas (OT), propias de la planta y las tecnologías de la información (IT), que gestionan la comunicación, el almacenamiento y el análisis de datos. Esta convergencia IT/OT habilita una infraestructura digital en la que los datos se pueden registrar y analizar de forma continua, facilitando la toma de decisiones y la optimización del desempeño en las industrias.

A diferencia de las revoluciones industriales previas, que estaban más centradas en la mecanización, la electrificación y la digitalización, la Industria 4.0 se basa en la interconexión de dispositivos y sistemas. Además, está enfocada en permitir una mayor

eficiencia, personalización y análisis en tiempo real, transformando las fábricas en entornos inteligentes y adaptativos.

Definiciones:

- **Arquitectura de control:** Esquema detallado que representa los equipos de control, comunicación y supervisión de una planta industrial, incluyendo redes y buses. Su objetivo es permitir la visualización y comprensión del sistema de automatización, desde los sensores y actuadores en el campo hasta los sistemas de supervisión como SCADA en la sala de control, a través de varias capas de gestión, supervisión y campo. Esta arquitectura es crucial para la ingeniería, instalación y mantenimiento de sistemas de control, definiendo los componentes, la comunicación y las conexiones.
- **Topología de red:** La topología de red informática se refiere a la disposición y organización de los elementos que conforman una red, como los dispositivos, cables y puntos de conexión. Es la forma en que se estructuran y conectan entre sí los nodos de la red, ya sea físicamente o de manera lógica. La topología de redes informáticas es fundamental para determinar cómo fluyen los datos dentro de la red, lo que impacta directamente en su rendimiento y eficiencia.
- **Topología estrella:** En una topología de estrella, todos los dispositivos de la red están conectados a un dispositivo central, como un switch o un hub. Este dispositivo central actúa como un conmutador que dirige el tráfico de datos entre los nodos. Cada nodo tiene una conexión directa con el dispositivo central, lo que facilita la gestión y el control del tráfico de red.
- **Tecnología de la información (IT):** Es un concepto que engloba todos los recursos, herramientas, sistemas y servicios vinculados al procesamiento, almacenamiento, gestión y transmisión de datos en una organización. En conjunto, todas estas tecnologías y dispositivos es lo que se denomina IT, es decir, cualquier sistema que base su funcionamiento y sus objetivos en este ámbito queda enmarcado dentro de lo que conocemos como tecnologías de la información.
- **Tecnología operativa (OT):** Es el conjunto de tecnologías que se ven involucradas directamente con los procesos operativos de una empresa. Es decir, aquellos elementos que permiten ejecutar, monitorear, medir y controlar los procesos productivos de las industrias.
- **Plataforma:** Una plataforma se refiere a una base o marco que permite que múltiples componentes, aplicaciones o tecnologías interactúen y trabajen juntas. Sirve como una base sobre la cual se puede construir otro software o hardware.

Las plataformas son esenciales en el mundo de la tecnología, la informática, la programación y las comunicaciones, ya que permiten el desarrollo y despliegue de diversas soluciones.

- **Protocolo:** El protocolo, se define como las reglas para la transmisión de la información entre dos puntos. Un protocolo de red de comunicación de datos es un conjunto de reglas que gobierna el intercambio ordenado de datos dentro de la red.
- **Modbus TCP/IP:** Modbus TCP/IP (a veces denominado protocolo Modbus TCP o simplemente Modbus TCP) es una variante de la familia Modbus de protocolos de comunicación sencillos e independientes del fabricante, diseñados para la supervisión y el control de equipos de automatización. Específicamente, abarca el uso de la mensajería Modbus en un entorno de intranet o internet mediante los protocolos TCP/IP. El uso más común de estos protocolos actualmente es la conexión Ethernet de PLC, módulos de E/S y pasarelas a otros buses de campo o redes de E/S simples.
- **Controlador lógico programable (PLC):** Un controlador lógico programable (PLC) es un tipo especial de controlador basado en microprocesador que utiliza una memoria programable para almacenar instrucciones e implementar funciones como lógica, secuenciación, temporización, conteo y aritmética para controlar máquinas y procesos.
- **Analizador de red:** Es un dispositivo especializado, diseñado para medir y analizar diversos parámetros eléctricos en un sistema de distribución o consumo de energía. Este dispositivo no solo registra datos básicos como voltaje y corriente, sino que también ofrecen información detallada sobre potencia activa, reactiva, factor de potencia y armónicos.
- **Estación de trabajo (Workstation):** Una Workstation o estación de trabajo puede entenderse como un tipo de computadora de altas prestaciones, diseñada para aplicaciones técnicas, científicas y profesionales que requieren gran capacidad de procesamiento y fiabilidad. Tradicionalmente, el término ha incluido desde computadoras especializadas para ingeniería y ciencia, hasta terminales conectadas a mainframes en redes locales.
- **Switch:** Un switch actúa como un controlador, que conecta computadoras, impresoras y servidores a una red en un edificio o campus. Permiten que los dispositivos en su red se comuniquen entre sí, así como con otras redes, y creen

una red de recursos compartidos. Mediante el uso compartido de información y la asignación de recursos, los switches ahorran dinero y aumentan la productividad.

- **Ecostruxure Machine Expert Basic:** Es una herramienta de programación diseñada para configurar, desarrollar, simular y poner en marcha programas para controladores lógicos de la serie M221 de Schneider Electric. Es una versión más sencilla y gratuita del software más completo, EcoStruxure Machine Expert.
- **Software Código Abierto:** El código abierto se refiere al software con un código fuente que está disponible abiertamente para que cualquiera lo use, modifique y distribuya. Fomenta la colaboración y la innovación al permitir a los desarrolladores acceder y mejorar el código, lo que lleva a una amplia variedad de soluciones de alta calidad y rentables.
- **Puerta de enlace de red (Gateway):** Un Gateway es un punto de acceso que actúa como intermediario entre dos redes o sistemas distintos, permitiendo la comunicación entre ellos. Su objetivo principal es traducir, adaptar y transferir información entre dos entornos que, de otro modo, no podrían comunicarse directamente debido a sus diferencias en protocolos o estructuras.
- **Node-Red:** Node-RED es una herramienta de desarrollo basada en flujo para programación visual desarrollada originalmente por IBM para conectar dispositivos de hardware, API y servicios en línea como parte de la Internet de las cosas. El objetivo de Node-RED es permitir que cualquier persona cree aplicaciones que recopilen, transformen y visualicen sus datos; creando flujos que puedan automatizar su mundo. Su naturaleza de código bajo lo hace accesible a usuarios de cualquier perfil, ya sea para domótica, sistemas de control industrial o cualquier otra área.
- **Grafana:** Grafana es un software libre basado en licencia de Apache 2.0,[2] que permite la visualización y el formato de datos métricos. Permite crear cuadros de mando y gráficos a partir de múltiples fuentes, incluidas bases de datos de series de tiempo como Graphite, InfluxDB y OpenTSDB.
- **Dashboard:** En términos de informática, un dashboard es una interfaz de usuario que organiza y presenta información en un formato fácil de leer, a menudo en tiempo real. Generalmente muestra indicadores clave de rendimiento (KPIs), métricas y otros datos relevantes. Piénsalo como el tablero de tu auto, donde puedes ver rápidamente los indicadores más importantes. De manera similar, en un dashboard informático puedes revisar el sistema, procesos o desempeño desde un solo lugar, lo que te permite monitorear y tomar decisiones de forma rápida.

- **Hardware:** El hardware se refiere a los componentes físicos de un sistema informático que puedes ver y tocar. Esto incluye dispositivos como la unidad central de procesamiento (CPU), módulos de memoria, discos duros, teclados, mouse, monitores y otros periféricos. El hardware es esencial para que una computadora funcione correctamente.
- **Software:** Se refiere a un programa o conjunto de programas diseñados para realizar tareas específicas en un ordenador. En términos sencillos, el software engloba los programas, las reglas y las instrucciones que permiten que un ordenador ejecute diversas funciones. Cuando hablamos de software, nos referimos a algo intangible que está en nuestros ordenadores. El software funciona mediante un lenguaje de programación, este código permite a los programadores instruir al ordenador sobre qué acciones realizar, cómo y cuándo ejecutarlas.
- **Backend:** El backend se refiere a la parte de una página web, aplicación o plataforma que opera en segundo plano y que no está accesible para los usuarios. En el backend es donde se lleva a cabo el almacenamiento y procesamiento de datos.
- **Frontend:** El frontend se refiere a todo lo que el usuario final ve y con lo que interactúa en un sitio web, aplicación o plataforma, como la interfaz gráfica, los botones, las animaciones y los formularios. El frontend se encarga de traducir el código a elementos gráficos estéticos y comprensibles para el público general.
- **Indicadores clave de rendimiento (KPI):** Los KPI son valores medibles que demuestran la eficacia con que una empresa está logrando sus objetivos comerciales clave. Estos indicadores varían dependiendo de la organización y sus objetivos, pero a menudo giran en torno a factores como el crecimiento de los ingresos, la adquisición de clientes y la eficiencia operativa. Esencialmente, los KPI proporcionan una forma de rastrear el progreso y tomar decisiones informadas basadas en datos cuantificables.
- **Datos:** En informática, los datos son representaciones simbólicas de hechos o instrucciones que pueden ser almacenadas, procesadas y transmitidas por un sistema computacional. Es decir, son la materia prima digital que alimenta a los sistemas (bits, registros, paquetes de red, etc.), y su procesamiento genera información útil para la toma de decisiones.

- **Base de Datos:** Es cualquier colección de información interrelacionada. Cuando escribimos la lista de la compra en un papel, estamos creando una pequeña base de datos análoga. Pero ¿qué es una base de datos en informática? En este contexto, una "base de datos" se define como una colección de información que se almacena en forma de datos en un sistema informático; por ejemplo, el inventario de compras del supermercado habitual.
- **SQL Server Express:** SQL Server Express es una base de datos gratuita de nivel básico, ideal para aprender y crear aplicaciones de escritorio y servidores pequeños basadas en datos. Es una excelente opción para desarrolladores de software independientes, programadores y aficionados que crean aplicaciones cliente. Si necesita funciones de base de datos más avanzadas, SQL Server Express se puede actualizar fácilmente a otras versiones superiores de SQL Server. SQL Server Express LocalDB, es una versión ligera de la edición Express que incluye todas sus funciones de programación, se ejecuta en modo usuario y cuenta con una instalación rápida y sin configuración, además de una lista reducida de requisitos previos.

CAPÍTULO 2. DEFINICIÓN DE LA ARQUITECTURA GENERAL.

La definición de la arquitectura general del sistema representa una etapa fundamental dentro del desarrollo del presente proyecto, ya que constituye la base técnica y conceptual sobre la cual se ejecuta posteriormente la implementación de la plataforma del SGEN.

Antes de implementar la programación, configuración o la integración de los diferentes softwares/programas, es necesario establecer la estructura del sistema, identificando los elementos tanto de hardware como de software, además de los protocolos de comunicación que permiten la correcta interoperabilidad entre los distintos niveles del sistema.

Esta fase permite garantizar la coherencia entre los recursos tecnológicos seleccionados y los requerimientos funcionales del proyecto, asegurando además la escalabilidad, confiabilidad y compatibilidad del sistema con los estándares industriales de comunicación y gestión energética.

Por tanto, el diseño de la arquitectura general no solo cumple una función descriptiva, sino que constituye la antesala al desarrollo práctico de la plataforma, facilitando una implementación ordenada y técnicamente sustentada en las siguientes etapas del proyecto, desde la disposición física hasta los protocolos y tecnologías de comunicación. En el presente capítulo se define cómo se conectan, comunican y organizan los componentes de hardware y software para permitir una transferencia de datos segura y eficiente.

2.1. Arquitectura del sistema

La arquitectura del sistema se representa mediante una pirámide de automatización donde convergen las tecnologías operativas (OT) y tecnologías de la información (IT), que organiza jerárquicamente los componentes del Sistema de Gestión Energética (SGEn) desde el nivel de campo hasta la capa de gestión. Esta estructura permite comprender cómo fluyen los datos eléctricos y energéticos a través de los distintos niveles, asegurando comunicación, trazabilidad y coherencia técnica entre hardware y software.

El modelo desarrollado considera cuatro niveles funcionales:

- Nivel 1 – Campo: Medición de variables eléctricas mediante el analizador de red.
- Nivel 2 – Control: Lectura de parámetros desde el analizador de red mediante protocolo Modbus TCP/IP al PLC Modicon M221 para el procesamiento de alarmas y funciones de simulación.
- Nivel 3 – Supervisión: En paralelo, el analizador se comunica directamente con Node-RED, que actúa como puerta de enlace (Gateway) y permite registrar los datos hacia SQL Server Express. Grafana y Node-RED se conecta a la base de datos para la visualización de dashboards y tendencias históricas.
- Nivel 4 – Gestión: Registro, almacenamiento y consulta de los datos mediante SQL Server Express.

Esta jerarquía garantiza la interoperabilidad entre los distintos componentes del sistema y sienta las bases para una gestión energética confiable y escalable.

La imagen 2.1 representa la pirámide de automatización utilizada en el proyecto

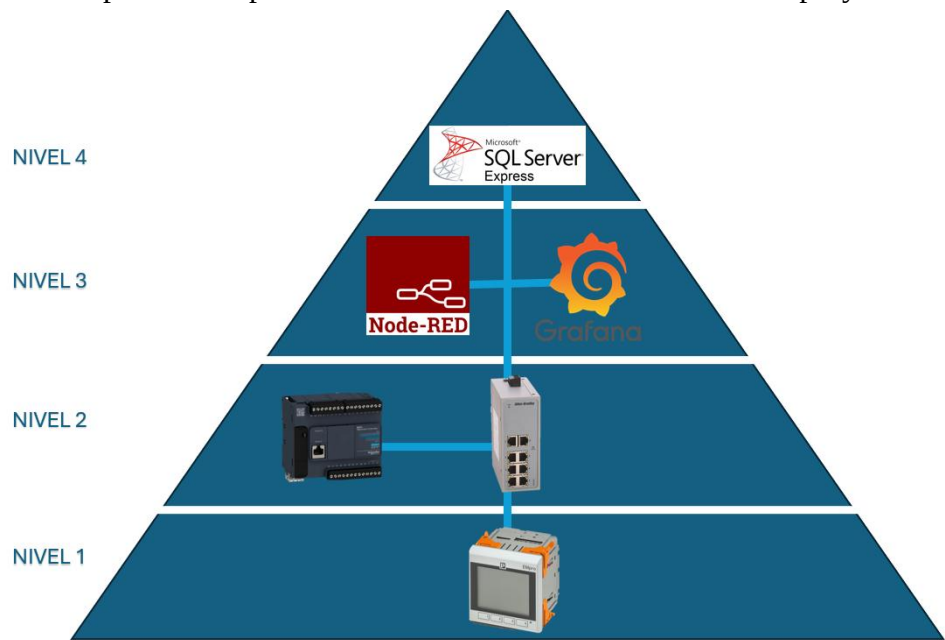


Imagen 2.1 – Pirámide de Automatización

2.2. Topología de Red

La topología adoptada es estrella, con un switch industrial como punto de convergencia, conectando de forma dedicada la workstation, el PLC y el analizador de red. Esta arquitectura minimiza el impacto de fallas, reduce la latencia y simplifica el mantenimiento y la escalabilidad, requisitos críticos para la adquisición confiable de datos, además de su visualización y almacenamiento.

La imagen 2.2 representa el diagrama de la topología real implementada en el proyecto.

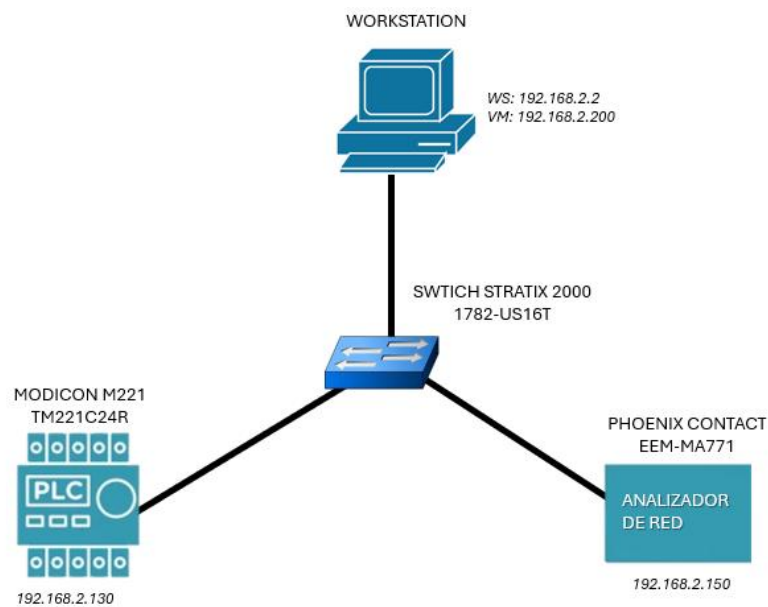


Imagen 2.2 – Topología de Red

2.3. Componentes de Hardware

La implementación del SGEN propuesto en el presente proyecto se basa en una arquitectura de hardware específica, diseñada para garantizar la correcta medición, transmisión y procesamiento de los datos. La selección de los equipos no es insustancial, sino que responde a criterios técnicos de precisión, fiabilidad en entornos industriales y, de forma crucial, la capacidad de interoperabilidad mediante protocolo de comunicación usado para este proyecto (Modbus TCP/IP).

Para facilitar la comprensión de la arquitectura implementada, los componentes se presentan siguiendo una estructura jerarquizada, análoga al modelo de la pirámide de automatización previamente diseñada.

A continuación, se detalla la especificación técnica de cada dispositivo y se describe su función específica dentro de la implementación del presente proyecto (SGEn).

2.3.1. Analizador de Red (EMpro EEM-MA771 Phoenix Contact)

Medidor de energía multifuncional, que se puede ver en la imagen 2.3, con conexión Rogowski directa e interfaz Modbus TCP integrada para medir parámetros eléctricos en instalaciones de baja tensión hasta 690 V. Forma parte de la familia EMpro de Phoenix Contact, orientada a la eficiencia energética y la gestión de consumo eléctrico en entornos industriales y comerciales.

En la arquitectura general de este SGEN, el EEM-MA771 se encuentra en el nivel 1 de la pirámide y cumple la función como dispositivo de campo encargado de la medición y adquisición de los parámetros eléctricos, tales como voltaje, corriente, potencia activa/reactiva/aparente, factor de potencia, frecuencia y distorsión armónica total (THD). Los datos obtenidos son enviados a la base de datos SQL Server Express a través de Node-RED como Gateway mediante protocolo Modbus TCP/IP, integrándose posteriormente a una interfaz de usuario mediante Node-RED y Grafana. Las especificaciones técnicas del medidor se indican en tabla 2.1.



Imagen 2.3 - Analizador de Red Phoenix Contact

Tabla 2.1- Especificaciones técnicas del Analizador de Red Phoenix Contact EEM-MA771

Función principal	Medición trifásica/Monofásica de variables eléctricas, energía y calidad de red
Tipo de red eléctrica	Trifásica (3 o 4 hilos), bifásica (2 hilos) o monofásica (1 hilo)
Tensión nominal de medición	3 × 230/400 V AC
Corriente nominal de entrada	1 A / 5 A (mediante transformadores de corriente externos)
Resolución de medición	16 bits
Exactitud típica	± 0,5 % (energía activa)
Frecuencia nominal	50 – 60 Hz (AC sinusoidal)
Potencia disipada máxima	10 VA
Consumo de potencia	≤ 4 W
Tensión de alimentación	100 – 400 V AC (±20 %) o 150 – 250 V DC (±20 %)
Separación galvánica – Alimentación	Contra todos los demás potenciales, aislamiento reforzado (IEC 61010-1)
Separación galvánica – Entrada de tensión	Aislamiento reforzado conforme a IEC 61010-2-030
Separación galvánica – E/S digitales	Aislamiento funcional
Separación galvánica – Interfaz de comunicación	Aislamiento funcional
Tensión de prueba dieléctrica	4 kV AC (50 Hz, 60 s)
Grado de polución	2
Categoría de sobretensión	Cat. III (300 V AC) / Cat. II (600 V AC)
Normas y especificaciones	IEC 61010-1 e IEC 61010-2-030
Protocolos de comunicación	Modbus TCP, Modbus RTU, HTTP, SNMP
Puertos de comunicación	Ethernet RJ45 (10/100 Mbit/s) y RS-485
Montaje	En riel DIN (carcasa 96 × 96 mm)
Pantalla local	LCD retroiluminada con teclas de navegación
Variables medidas	Tensión, corriente, potencia activa/reactiva/aparente, energía, frecuencia, cos φ, THD-V/I, armónicos individuales
Frecuencia de muestreo (típica)	1 s (configurable)

2.3.2. PLC MODICON M221 TM221C24R Schneider Electric

El controlador lógico Modicon M221, ilustrado en la imagen 2.4, es un controlador de EcoStruxure Machine. EcoStruxure Machine™ de Schneider Electric es una solución intuitiva para la automatización de máquinas con todas las características y funciones que necesita para construir máquinas que mejorarán sus resultados.

En la arquitectura general de este SGE_n, el PLC M221 se ubica en el Nivel 2, actuando como elemento de control para la gestión de alarmas y simulaciones en relación con la unidad de producción (ton/h) por consumo energético (kwh) enviando los registros a la base de datos mediante gateway (Node-RED).

El equipo se conecta directamente con el switch industrial mediante interfaz física RJ-45, compartiendo red con el analizador y la estación de trabajo. Su conexión con Node-RED se realiza a través del protocolo Modbus TCP/IP, lo que permite transferir estados, alarmas y valores simulados hacia el siguiente nivel para su registro en la base de datos SQL Server Express y posterior visualización a través de configuración en Grafana y Node-RED. Las especificaciones técnicas del PLC se indican en tabla 2.2.



Imagen 2.4 - PLC Modicom M221

Tabla 2.2- Especificaciones técnicas del PLCM221

Serie - Modelo	Modicon M221- TM221C24R
Tipo de controlador	Controlador lógico compacto
Tensión nominal de alimentación	100 – 240 V AC
Entradas digitales	14 (conforme IEC 61131-2 Tipo 1)
Entradas analógicas	2 canales (0 – 10 V DC)
Salidas digitales	10 relés normalmente abiertos
Tensión de salida	5 – 125 V DC / 5 – 250 V AC
Número máximo de módulos de expansión	7 locales / 14 remotos

Frecuencia de red	50/60 Hz
Límites de tensión de alimentación	85 – 264 V
Consumo de potencia	55 VA con expansión máxima
Corriente de entrada	40 A
Corriente de salida del bus de expansión	0,52 A a 5 V – 0,16 A a 24 V
Resolución de entrada analógica	10 bits (10 mV)
Tiempo de conversión	1 ms por canal + controlador
Tiempo de respuesta entradas/salidas	35 µs (off), 10 ms (on) típico
Tensión máxima de salida	277 V AC
Durabilidad eléctrica	100 000 ciclos AC-12 240 V / 300 000 ciclos AC-15 120 V
Comunicación integrada	1 × Ethernet RJ45 (Modbus TCP/IP) – 1 × RS-485 (Modbus RTU) – 1 × USB Mini-B (programación)
Protocolo soportado	Modbus TCP, Modbus RTU, Ethernet/IP
Montaje	En riel DIN o mural
Temperatura de operación	0 °C – 55 °C
Tipo de protección	Sin protección a 5 A (según catálogo)

2.3.3. Switch Ethernet no administrable Stratix 2000 / 1782-US16T

El switch industrial no administrable de Rockwell Allen-Bradley Stratix 2000, indicado en la imagen 2.5, es un dispositivo compacto diseñado para aplicaciones de automatización que requieren conectividad Ethernet confiable y de fácil integración. Su diseño “plug-and-play” permite una instalación rápida sin necesidad de configuración previa, facilitando la interconexión entre controlador, analizador de red, gateway y estación de trabajo dentro de la topología estrella. Este switch es un conmutador de Ethernet mediante direcciones MAC, que no realiza enrutamiento ni separación de dominios IP.

Dentro de la arquitectura de red del presente proyecto, el Stratix 2000 se ubica en el nivel de enlace de datos (Nivel 2), actuando como nodo central de enlace.

Desde este punto, se interconectan: Analizador de red Phoenix Contact EEM-MA771, que transmite las mediciones eléctricas por Modbus TCP/IP, PLC Modicon M221, encargado de la gestión de alarmas y simulación, gateway Node-RED, responsable del envío de datos hacia la base de datos SQL Server Express y el ambiente de configuración y desarrollo (Workstation). Las especificaciones técnicas del Switch se indican en la tabla 2.3.

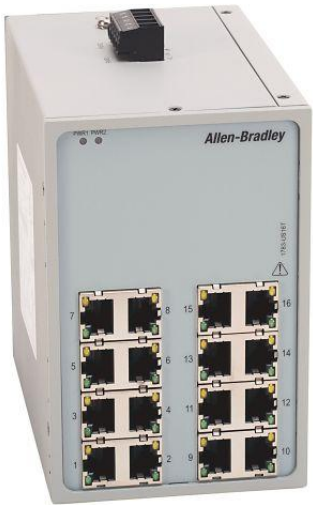


Imagen 2.5 - Switch Stratix 2000

Tabla 2.3 - Especificaciones técnicas Stratix 2000

Serie / Número de Parte	Stratix 2000 – 1783-US16T
Tipo de dispositivo	Switch industrial no administrado
Número total de puertos	16 puertos Ethernet RJ-45 (10/100 Mb/s)
Tipo de conexión	Cobre (RJ-45 no SFP)
Velocidad de conmutación	10/100 Mb/s (full-duplex autonegociable)
Capacidad de conmutación	3.2 Gbps (backplane)
Tipo de funcionamiento	“Plug-and-Play” – no requiere configuración
Rango de temperatura de operación	–40 °C a +75 °C
Tensión de alimentación	12 – 48 V DC (±10 %) con doble entrada redundante
Consumo de potencia	< 8 W
Carcasa	Metálica reforzada (IP30) para uso industrial
Montaje	En riel DIN estándar
Protección eléctrica	Contra tormentas de difusión y tráfico no deseado
Certificaciones	UL, CE, RoHS, IEC 60068
Dimensiones aproximadas	140 × 48 × 120 mm (según versión)
Peso	≈ 0,7 kg

2.3.4. CPU (Estación de Trabajo)

La estación de trabajo, que sirve como anfitriona (host) para la máquina virtual del SGen está constituida en un procesador Intel(R) Core (TM) i5-3330. Esta unidad central de procesamiento (CPU), basada en la microarquitectura Ivy Bridge, dispone de cuatro núcleos físicos y cuatro hilos de ejecución, operando a una frecuencia base de 3.00 GHz. Tal como se indica en la imagen 2.6. La elección de este componente es estratégica, ya que ofrece soporte nativo para la Tecnología de Virtualización de Intel (Intel VT-x). Esta característica de hardware es un requisito técnico esencial, pues permite al hipervisor VMware Workstation gestionar y asignar recursos de cómputo de manera directa y eficiente al sistema operativo.

La disponibilidad de 4 núcleos dedicados asegura que la carga de trabajo de la virtualización pueda ser manejada en paralelo, dedicando recursos al sistema invitado sin comprometer la estabilidad y el rendimiento del sistema anfitrión, garantizando así la operación continúa requerida por el sistema de energía implementado.

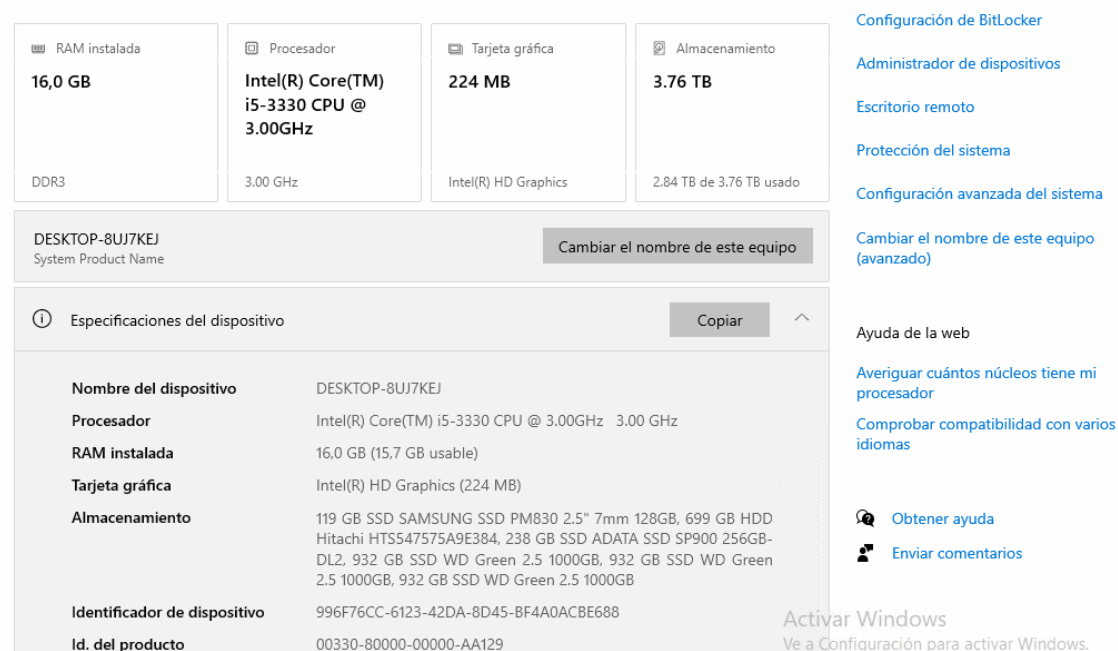


Imagen 2.6 – Especificaciones Work Station

2.4. Componentes de Software

Para complementar la arquitectura física descrita en la sección anterior, la funcionalidad del SGE se lleva a cabo a través de un ecosistema de software integrado. Esta plataforma de software constituye el "cerebro" del sistema, siendo responsable de ejecutar la lógica de medición de los parámetros, procesamiento, registro y almacenamiento de los datos y la presentación final de la interfaz de usuario.

La arquitectura de software se ha diseñado en relación con un entorno virtualizado, una decisión metodológica que permite encapsular los servicios y herramientas, garantizando su portabilidad y facilitando la administración centralizada del sistema.

A continuación, se detallan las aplicaciones y plataformas seleccionadas, explicando su función específica dentro del presente proyecto, desde el sistema operativo base hasta las aplicaciones u herramientas de servicios, configuración y visualización.

2.4.1. Estación de Trabajo

La estación de trabajo del presente proyecto constituye el entorno u ambiente principal de configuración y desarrollo del SGE multiplataforma. Desde esta estación se configuran y administran todos los servicios, actuando como servidor de aplicación.

La estación de trabajo aloja una máquina virtual basada en VMware Workstation PRO Versión 15 con sistema operativo Windows 10. Dentro de esta máquina virtual corren los siguientes servicios: Team Viewer, Node-RED, Grafana, SQL Server Express, así como también los softwares y herramientas de configuración y edición como ModScan, SQL Management Studio y Ecostruxure Machine Expert Basic.

2.4.2. Node-RED

Plataforma que sirve de puerta de enlace hacia la base de datos SQL Server Express para el analizador de red EEM-MA771 y el PLC Modicon M221, a través de protocolo Modbus TCP/IP. Además, también forma parte de la configuración para la interfaz de usuario, donde se generan dashboards y tendencias

2.4.3. SQL Server Express

Registro y almacenamiento histórico de parámetros, alarmas, trazabilidad y soporte para visualización en Grafana y Node-RED.

2.4.4. Grafana

Generación de dashboards para análisis de energía, tendencias, y visualización de indicadores.

2.4.5. ModScan

Herramienta auxiliar utilizada para prueba de comunicación Modbus TCP y validación de registros del analizador y PLC.

2.4.6. EcoStruxure Machine Expert Basic

Configuración, simulación y programación de rutinas de alarmas en el controlador Modicon M221.

2.4.7. Windows 10

Plataforma base de desarrollo y administración de servicios locales, compatible con bases de datos, navegadores y elementos de la arquitectura del SGen.

2.5. Instalación y configuración

En este apartado se detallan los procedimientos realizados para la instalación y configuración de los componentes de software y hardware que integran la plataforma del SGen. Se abordan las etapas necesarias para la correcta implementación del entorno de desarrollo, incluyendo Node-RED, Grafana y SQL Server Express, así como su integración con los dispositivos de hardware a través del protocolo Modbus TCP/IP.

2.5.1. Configuración de Ambiente de Trabajo (Workstation)

Para la ejecución del sistema se configura una máquina virtual en VMware Workstation Pro, alojada en un host principal, con sistema operativo Windows 10, 8 GB de memoria RAM, 4 procesadores asignados y un disco virtual de 100 GB. La máquina se configura con dos tarjetas de red: una destinada al acceso a internet y otra mapeada a la red local industrial, permitiendo la comunicación con el PLC, el medidor de energía y el servidor de base de datos. Esta configuración establece el ambiente de trabajo necesario para alojar los servicios de Node-RED, SQL Server y Grafana, así como también las herramientas de configuración y edición como ModScan, SQL Management Studio y Ecostruxure Machine Expert Basic.dentro de una plataforma aislada y controlada.

2.5.2. Instalación de Node-RED

- Requisitos previos: versión de Windows 10, Node.js, conexión a red local.
- Procedimiento:
 1. Se realiza la descarga de Node.js desde el sitio oficial. (<https://nodejs.org/en/>)
 2. Se instala mediante el archivo descargado: node-v24.11.0-x64.msi, tal como se indica en la imagen 2.7

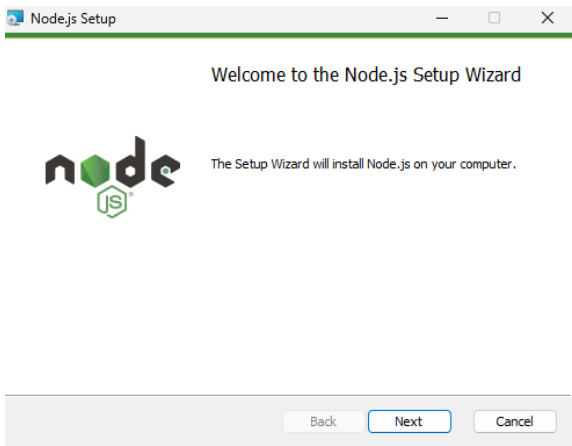


Imagen 2.7 - Instalación Node Red

3. Se Accede a consola de node.js command prompt
4. Se Ejecuta comando: `npm install -g --unsafe-perm node-red`, como se observa en la imagen 2.8

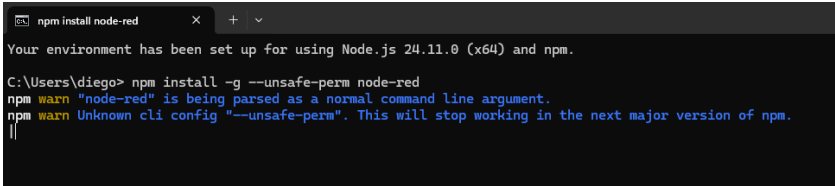


Imagen 2.8 - Node.js

5. Una vez terminada la instalación se ejecuta el comando: `node-red`

- 6. Se accede desde el navegador a <http://localhost:1880> para verificar la correcta instalación de Node-RED, observándose la interfaz inicial del sistema, tal como se muestra en la imagen 2.9.

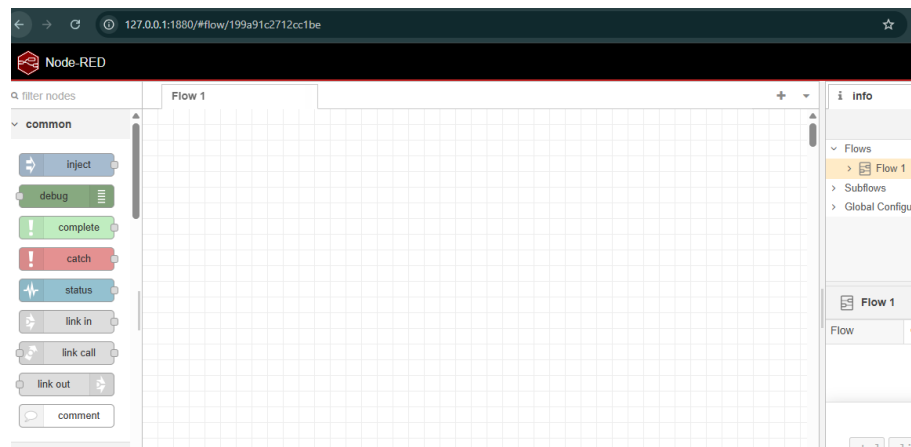


Imagen 2.9 – Vista General de Node Red en LocalHost

2.5.3. **Instalación de Grafana**

- Requisitos previos: versión de Windows 10, conexión a red local.
- Procedimiento:
 - 1. Se realiza la descarga de la versión de Grafana para Windows desde el sitio oficial
(<https://grafana.com/grafana/download?pg=get&plcmt=selfmanaged-box1-cta1&platform=windows>)
 - 2. Se Instala Grafana, como se observa en la imagen 2.10, mediante el archivo descargado:

grafana-enterprise_12.2.1_18966576697_windows_amd64.msi,

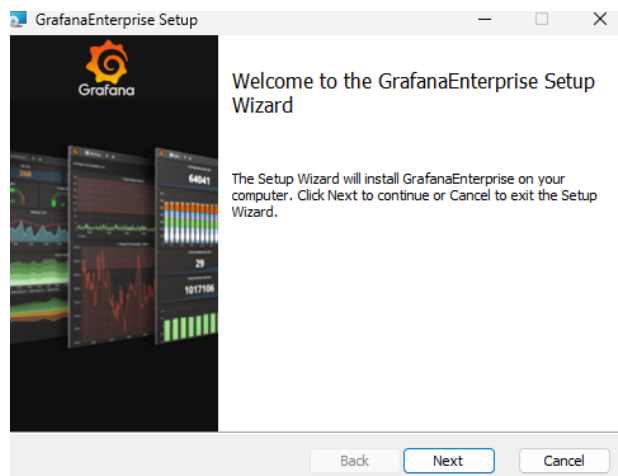


Imagen 2.10 - Instalación Grafana

- 3. Una vez finalizada la instalación se accede desde navegador a <http://localhost:3000>

4. Se inicia sesión utilizando las credenciales por defecto (admin/admin), tras lo cual se despliega la interfaz inicial del sistema, mostrada en la imagen 2.11

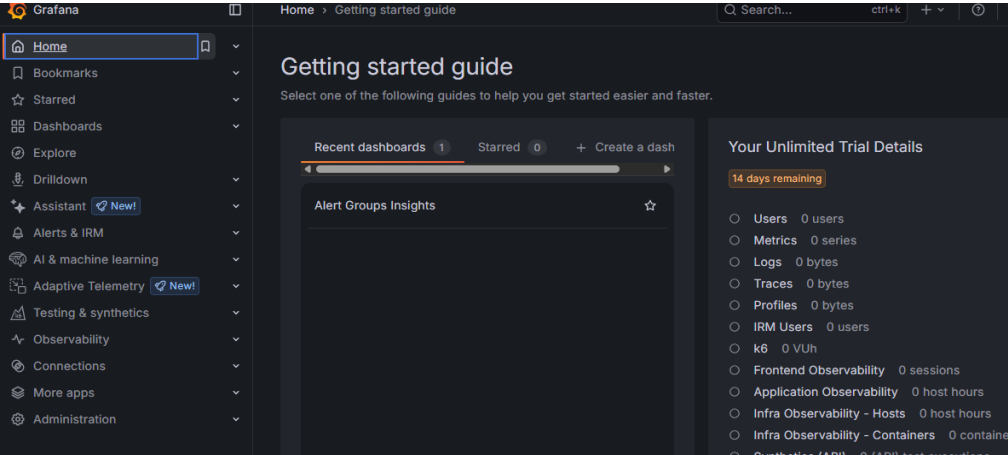


Imagen 2.11- Vista General de Grafana

2.5.4. Instalación de ModScan

- Requisitos previos: versión de Windows 10, conexión a red local.
- Procedimiento:
 1. Se Ingresa a sitio web: <https://github.com>
 2. Posteriormente se Ingresa al siguiente enlace:
<https://github.com/sanny32/OpenModScan>
 3. Se Ingresa a menú descargas y se selecciona la versión Open ModScan 1.11 seleccionando el recurso qt6-omodscan_1.11.1-1_amd64.exe
 4. Se instala el archivo descargado ejecutando como administrador. En la imagen 2.12 se aprecia una interfaz gráfica que permite configurar parámetros básicos como el identificador del dispositivo, el tipo de registro Modbus y el rango de direcciones a consultar.

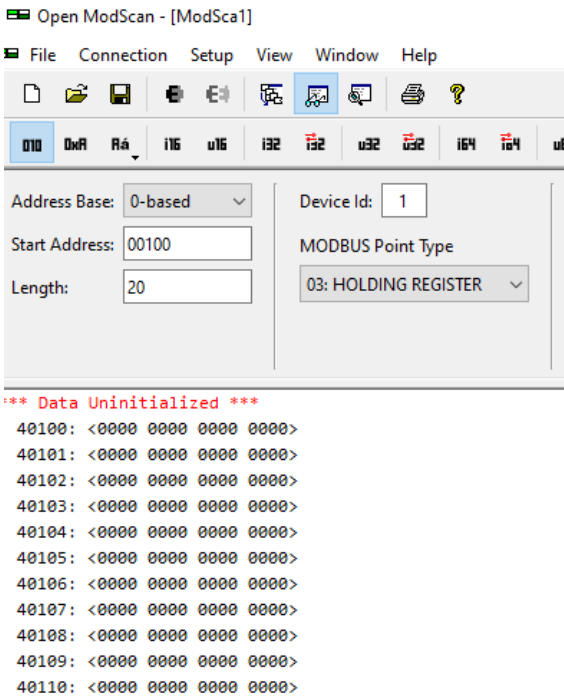


Imagen 2.12 - Vista general de la interfaz del software Open ModScan

2.5.5. Instalación de SQL y Management Studio

- 1. Se descarga desde el sitio oficial de Microsoft, en la sección de SQL Server Express 2019 en el menú de descargas (<https://www.microsoft.com/es-cl/download/>).
- 2. Luego de descargar, se guarda, se ejecuta como administrador y posteriormente se elige la versión básica y se aceptan los términos de licencia.
- 3. Se selecciona la ubicación e instalación, quedando instalado con éxito en la estación de trabajo del presente proyecto como se ilustra en la imagen 2.13 y 2.14.

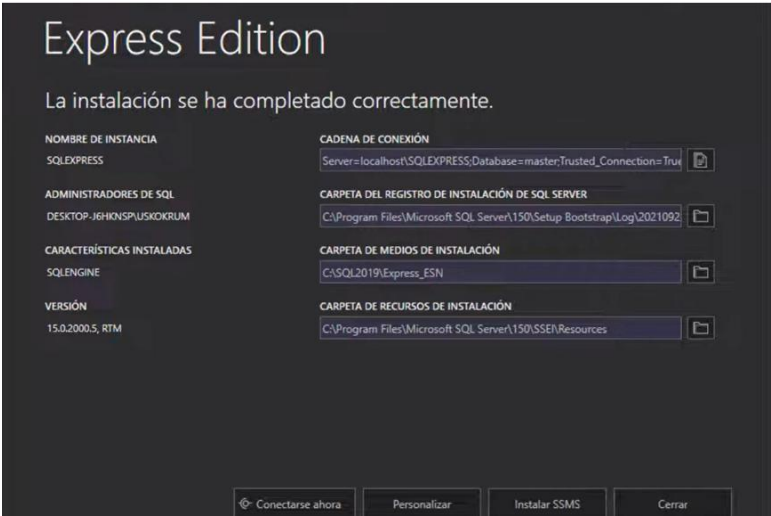


Imagen 2.13- Instalación SQL

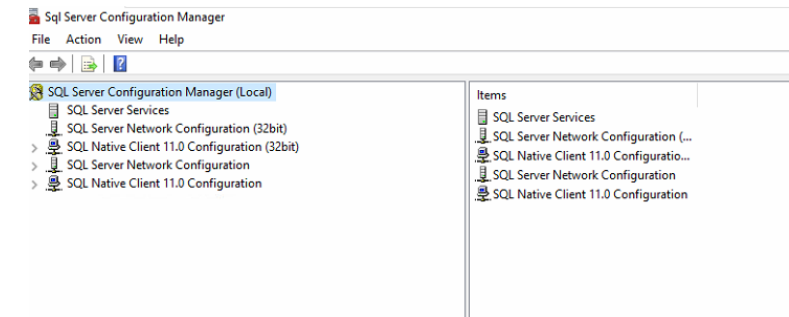


Imagen 2.14 - Instalación SQL Server Configuration

- 4. Posteriormente se realiza la descarga del software Management Studio 21 desde el sitio oficial de Microsoft (<https://learn.microsoft.com/es-es/ssms/install/install>) como se indica en la imagen 2.15 y 2.16

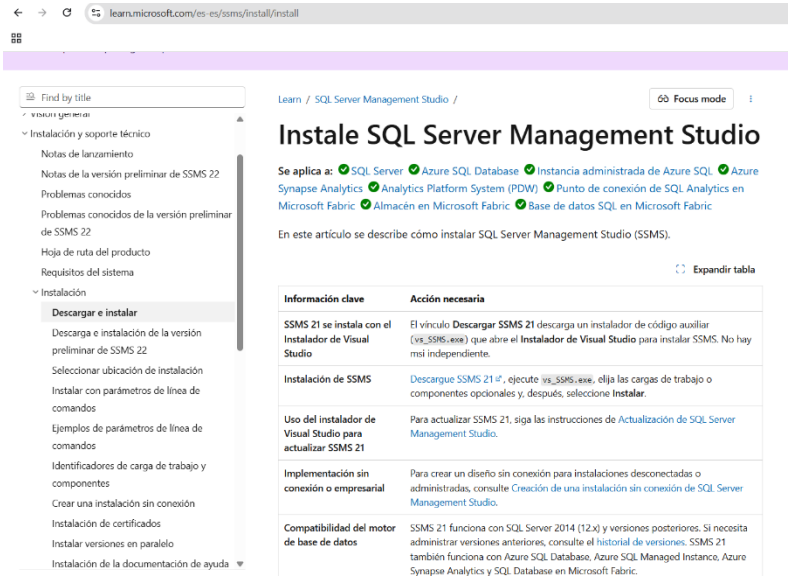


Imagen 2.15- Instalación SQL Management Studio inicio

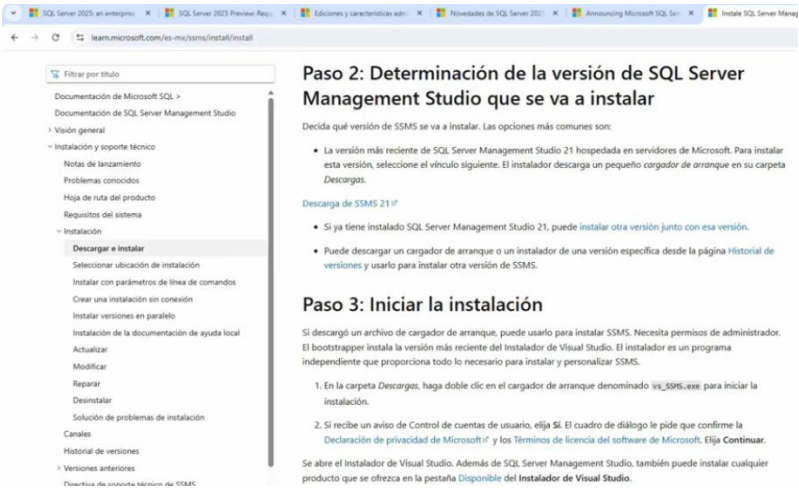


Imagen 2.16 - Instalación SQL Management Studio final

5. Una vez completada la instalación, la aplicación se inicia correctamente, desplegando su interfaz principal, la cual se presenta en la imagen 2.17

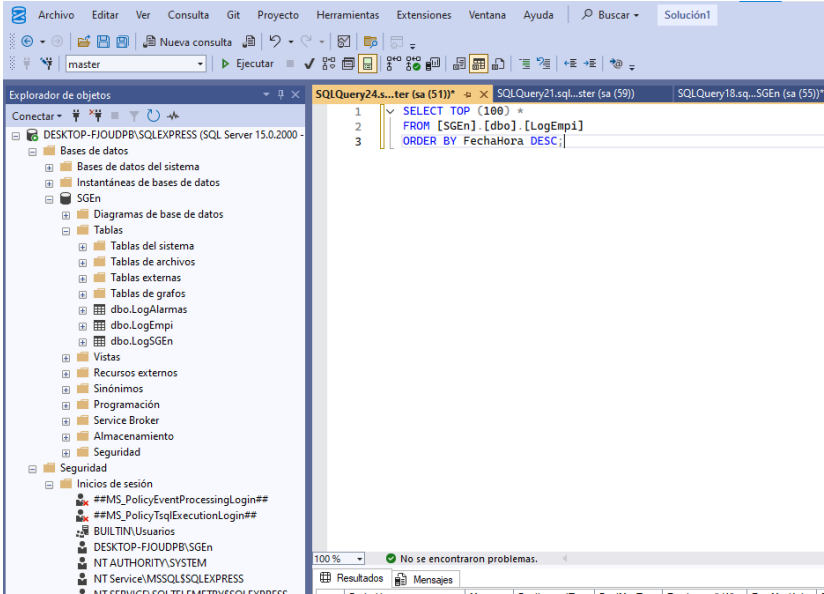


Imagen 2.17- Vista General de SQL Management Studio

2.5.6. Instalación de EcoStruxure Machine Expert Basic y Configuración de PLC MODICON M221

- Se descarga el instalador desde el portal oficial de Schneider Electric:
- https://www.se.com/in/en/download/document/MachineExpertBasicV1_3/
- Se ejecuta el archivo MachineExpertBasic_V1.3_build215.exe y se siguen los pasos indicados por el asistente de instalación como se indica en la imagen 2.18.
- Se aceptan los términos de licencia para continuar con la instalación.
- Una vez completado el proceso, se inicia el programa desde el acceso directo del escritorio o desde el menú de inicio.

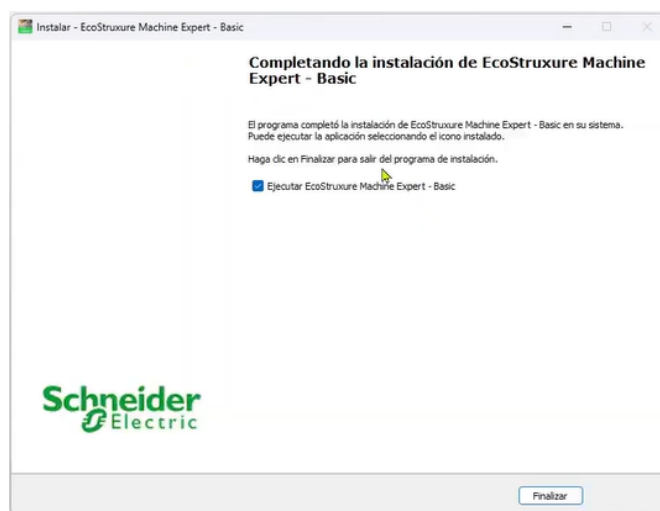


Imagen 2.18 - Instalación EcoStruxure Machine Expert

Configuración de red del PLC Modicon M221:

- Modelo configurado: TM221C24R
- Entradas digitales: 14
- Salidas relé: 10
- Alimentación: 100–240 V AC
- Interfaz física: RJ-45

Parámetros de red asignados:

- Dirección IP 192.168.2.130
- Máscara de subred 255.255.255.0
- Puerta de enlace 192.168.2.1
- Protocolo: Modbus TCP/IP

Procedimiento de configuración:

- Se conecta el PLC al switch Stratix 2000 mediante un cable Ethernet CAT6.
- Se ejecuta EcoStruxure Machine Expert Basic y se crea un nuevo proyecto, seleccionando el modelo TM221C24R, según lo presentado en la imagen 2.19



Imagen 2.19 - Configuración PLC M221

- Se ingresa al menú Configuración de red y se asigna una dirección IP estática acorde a la topología definida (192.168.2.130) tal como se puede ver en la imagen 2.20.

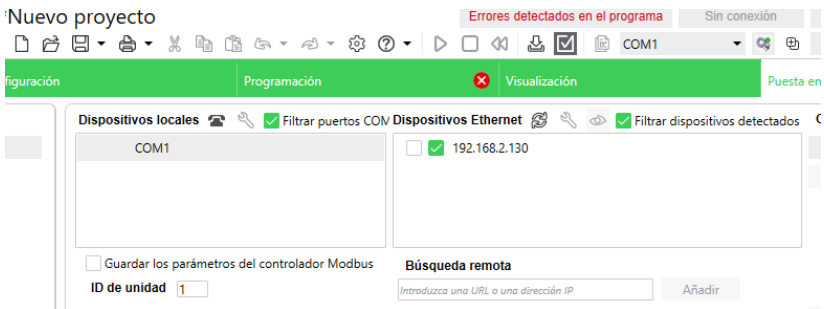


Imagen 2.20 - Configuración de red PLC M221

- Se guardan los cambios y se descarga la configuración de IP al controlador.
- Se realiza la Verificación de comunicación del PLC Mediante la ejecución de comando ping en la consola de Windows.

2.5.7. Conexionado y Configuración de Analizador de Red Empro

El equipo se configura para realizar medición monofásica, alimentado a 220 V AC – 50 Hz, empleando una bobina Rogowski para la detección de corriente en un tablero de distribución monofásica de un taller de ingeniería como se indica en la imagen 2.21.

Conexionado eléctrico:

- Tipo de medición: Monofásica (1 fase + neutro).
- Tensión nominal: 220 V AC.
- Frecuencia nominal: 50 Hz.
- Entradas de tensión: L → borne U1 / N → borne Vn

- Entrada de corriente: Bobina Rogowski (4000A / 100mV/kA) conectada al canal RC1.
- Puesta a tierra: borne PE conectado a la barra de tierra del tablero.

Diagrama de Conexión:

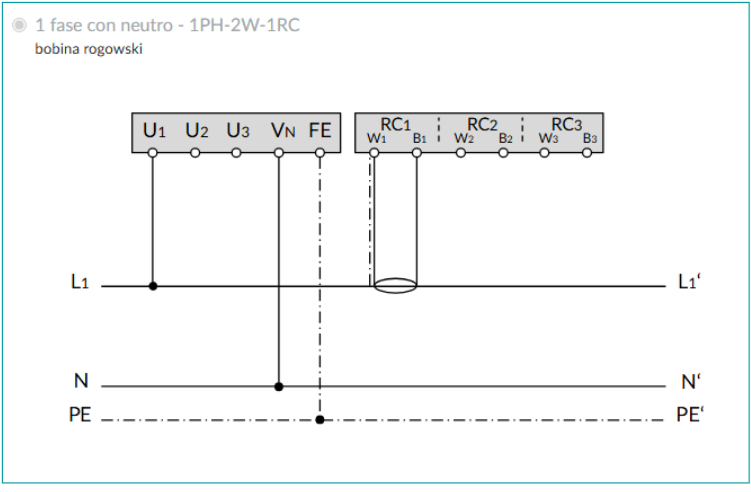


Imagen 2.21- Diagrama Conexión Analizador de Red

Configuración de comunicación:

- Interfaz Física: RJ-45 integrada.
- Protocolo: Modbus TCP/IP.
- Parámetros de red configurados:
- Dirección IP: 192.168.2.150
- Máscara: 255.255.255.0

Procedimiento de configuración:

- Conexión de analizador al switch Stratix 2000 mediante interfaz física RJ-45 CAT6.
- Definición de los parámetros IP, máscara y activación de protocolo y transporte Modbus TCP desde el analizador, como se muestra en la imagen 2.22.

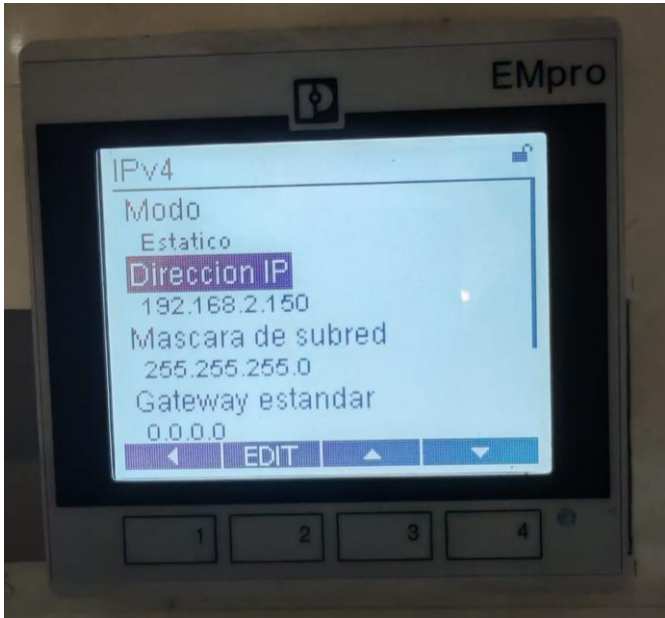


Imagen 2.22 - Parámetros de comunicación de analizador de red

- Se verifica la comunicación mediante comando ping desde la Workstation como se visualiza en la imagen 2.23.



Imagen 2.23 - Ping a analizador de red

- Se realiza la selección del tipo de red quedando como: 1 fase 1 neutro 1PH – 2W – 1RC y se instala el analizador de red dentro del Tablero de Distribución de Fuerza y Alumbrado como se indica en la imagen 2.24



Imagen 2.24 - TDAyF

2.5.8. Conexionado eléctrico general del sistema

A continuación, se presenta el diagrama general de conexión eléctrica del sistema (imagen 2.25), que muestra la relación física y de alimentación entre los componentes descritos:

- Estación de Trabajo (Workstation): Alimentada a 220 V AC.
- Switch Ethernet: Alimentado mediante fuente de 24 V DC (fuente industrial conectada a 220 V AC).
- PLC Schneider M221: Alimentado directamente desde red de 220 V AC.
- Analizador de Red Phoenix Contact EMpro: Alimentado a 220 V AC, con conexión de medición monofásica (L–N–PE).

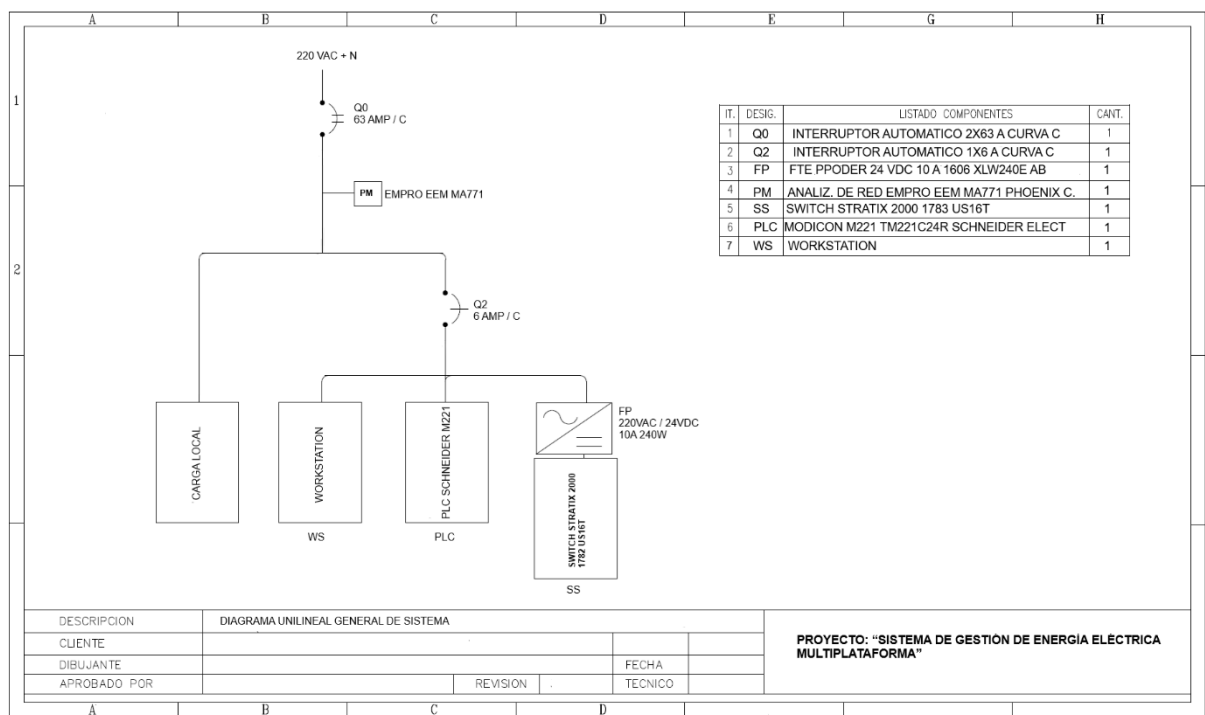


Imagen 2.25 - Diagrama Unilineal General de sistema

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL BACKEND DEL SISTEMA

El desarrollo del Backend constituye una de las etapas fundamentales del Sistema de Gestión de Energía (SGEn) propuesto, ya que integra los procesos de adquisición, tratamiento, procesamiento y almacenamiento de datos provenientes del analizador de red y del PLC. Esta capa es la responsable de garantizar que las mediciones energéticas y de proceso se registren de manera continua, confiable y estructurada, permitiendo el registro en base de datos SQL Server Express y posterior visualización en la interfaz de usuario

En este capítulo se detallan los procedimientos de implementación del backend, describiendo la comunicación mediante protocolo Modbus TCP/IP, la lógica aplicada en Node-RED para la gestión de flujos, el tratamiento de las variables adquiridas desde el Analizador de Red, y la forma en que estas son almacenadas en el modelo de datos diseñado.

3.1. Arquitectura del Backend

La arquitectura del backend se estructura como un sistema modular, garantizando que las variables medidas sean transferidas y acondicionadas correctamente para su procesamiento y visualización. En esta etapa, el enfoque se centra en establecer la comunicación entre cada uno de los componentes del Sistema de Gestión de Energía (SGEn) como se señala en la imagen 3.1.

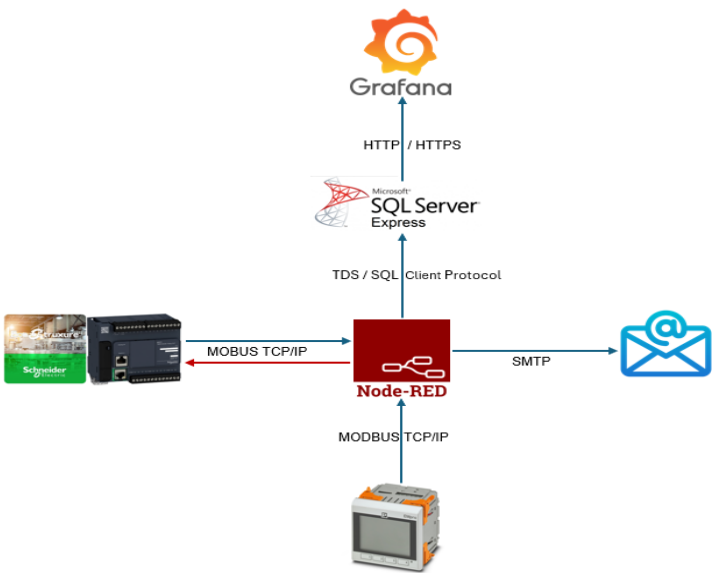


Imagen 3.1 - Arquitectura del backend

La operación del backend se estructura en un flujo que asegura la correcta gestión de los datos. Este flujo comprende tres funciones principales:

1. Lectura y escritura de los registros Modbus entregados por el analizador y PLC.
2. Procesamiento y normalización de los valores adquiridos.
3. Registro de variables en base de datos SQL Server Express.

De acuerdo con esta arquitectura, el sistema garantiza que el procesamiento de los datos se realice de forma eficiente, permitiendo la visualización y análisis mediante el uso de indicadores energéticos.

3.2. Adquisición de Datos desde el Analizador de Red

La adquisición de datos eléctricos desde el analizador Phoenix Contact EEM-MA771 se realiza mediante el uso del protocolo de comunicación Modbus TCP/IP. La configuración de este enlace de comunicación se implementa mediante la ejecución de las siguientes actividades:

3.2.1. Validación de registros Modbus mediante ModScan

Antes de integrar el analizador Phoenix Contact EEM-MA771 al flujo de datos de Node-RED, se realiza la validación del direccionamiento real de sus registros Modbus. Por este motivo, se ejecuta un proceso de verificación utilizando la herramienta Open ModScan. Para establecer esta conexión se configura ModScan en modo Modbus TCP/IP, ingresando la dirección IP del analizador (192.168.2.150) y el puerto estándar 502. Esta configuración, señalada en la imagen 3.2, permite iniciar la comunicación y comenzar la lectura de registros.

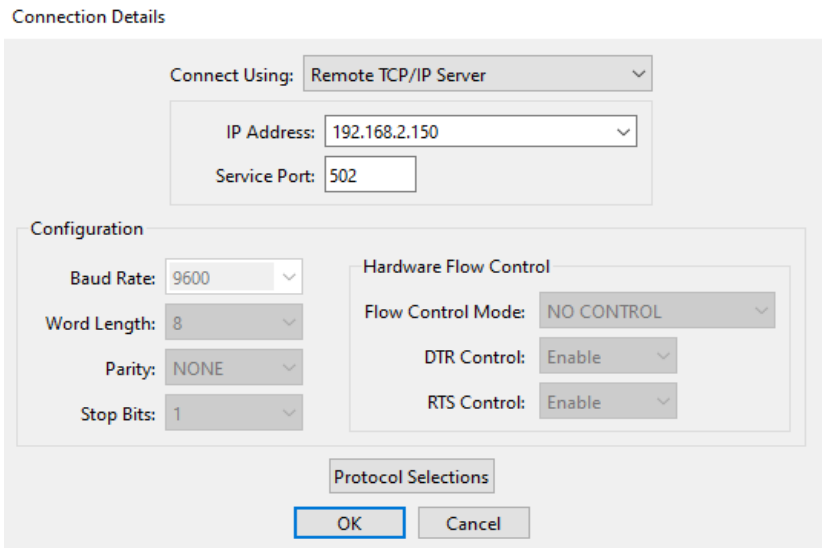


Imagen 3.2 - Configuración ModScan

Utilizando el software Modscan como maestro, permite registrar y confirmar la coherencia de los parámetros proporcionados por el analizador de red operando como esclavo en la comunicación Modbus. En la imagen 3.3, se identifican los Registros Modbus de acuerdo con la tabla de registros obtenida en la documentación técnica del analizador de red.

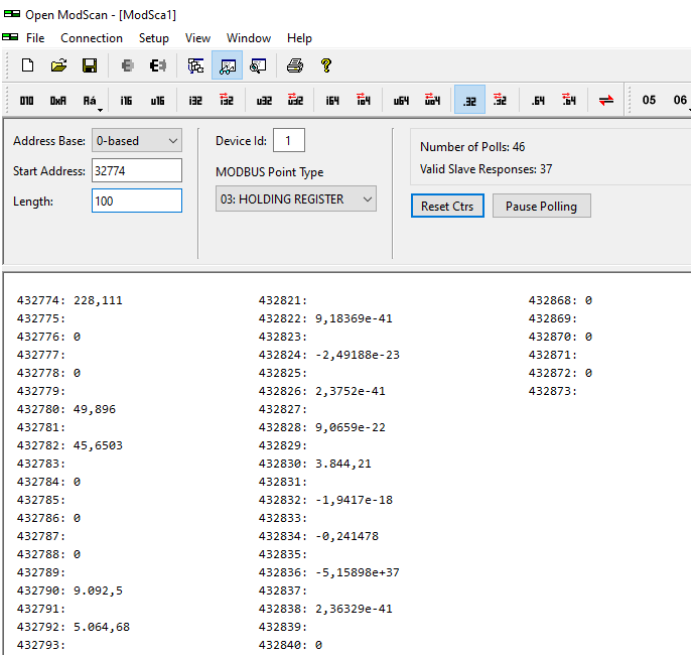


Imagen 3.3 -validación de los Registros Modbus en Modscan

Finalmente, se consolida una tabla de Registros Modbus utilizados para la adquisición de las variables requeridas por este proyecto, garantizando la trazabilidad y facilitando su posterior uso en los flujos de lectura y acondicionamiento de los datos. De esta manera se evitan errores de mapeo, desplazamiento de registros o interpretación incorrecta de los datos. La tabla 3.1 resume los resultados del proceso de validación, mostrando la dirección y el detalle de cada Registro Modbus del presente proyecto:

Tabla 3.1 - Registros Modbus de parámetros Eléctricos del Sistema

Variable eléctrica	Tipo de dato	Dirección Modbus	Unidad
Voltaje fase–neutro	Float 32-bit	32774–32775	V
Corriente	Float 32-bit	32778–32779	A
Frecuencia	Float 32-bit	32784–32785	Hz
Potencia activa	Float 32-bit	32790–32791	kW
Potencia reactiva	Float 32-bit	32792–32793	kvar
Potencia aparente	Float 32-bit	32794–32795	kVA
Factor de potencia	Float 32-bit	32800–32801	—
THD de voltaje	Float 32-bit	32804–32805	%
THD de corriente	Float 32-bit	32806–32807	%
Energía activa acumulada	UNS 16-bit	32024	Wh

3.2.2. Lectura de registros mediante nodo Modbus Read en Node-RED

Con las direcciones Modbus previamente validadas, se configura en Node-RED el nodo Modbus Read, encargado de establecer la comunicación TCP/IP con el analizador Phoenix Contact EEM-MA771 y realizar la lectura continua de los parámetros. Para ello, se define un cliente Modbus TCP apuntando directamente al analizador, especificando su dirección IP (192.168.2.150), el puerto estándar 502 y el Unit-ID del dispositivo. Tal como se indica en la imagen 3.4. Esta configuración permite que Node-RED funcione como maestro Modbus, habilitando la comunicación para la lectura de los registros requeridos para el monitoreo.

Edit Modbus-Read node > Edit modbus-client node

Delete

Cancel

Update

⚙ Properties

⚙

📄

Settings

Queues

Optionals

Name

EMPRO

Type

TCP

Host

192.168.2.150

Port

502

TCP Type

DEFAULT

Unit-Id

1

Timeout (ms)

5000

🔌 Reconnect on timeout

☒

Reconnect timeout (ms)

2000

Imagen 3.4 - Config. Cliente Modbus Read

El nodo se ajusta para ejecutar lecturas cada 1 segundo, obteniendo un bloque completo de registros en una sola transacción. Los datos recibidos se entregan en formato de único Buffer, representando la trama Modbus que posteriormente será decodificada para extraer cada valor eléctrico. En el nodo Modbus-Read se configura la lectura mediante la función FC3: Read Holding Registers, estableciendo como dirección inicial el registro 32774, como se indica en la imagen 3.5, correspondiente al primer parámetro requerido del analizador EEM-MA771. A partir de este registro se obtiene un bloque continuo de datos, lo que permite capturar en una sola operación las variables eléctricas posteriores almacenadas en registros consecutivos. Esta estrategia optimiza el proceso de adquisición, ya que evita múltiples lecturas independientes y asegura la sincronización de todos los valores provenientes del equipo.

Edit Modbus-Read node

Delete

Cancel

Done

⚙ Properties

⚙

📄

🖨

Settings

Optionals

Name

Name

Topic

Topic

Unit-Id

FC

FC 3: Read Holding Registers ▾

Address

32774

Quantity

100

Poll Rate

1

second(s) ▾

⏻ Delay to activate input

☐

Allow oversized messages

☐

Server

EMPRO ▾

✎

+

Imagen 3.5 - Config. Modbus Read

3.2.3. Decodificación de la trama Modbus mediante Buffer Parser en Node-RED

Una vez obtenida la trama Modbus desde el nodo Modbus Read, los datos llegan a Node-RED en formato buffer, es decir, como una secuencia de bytes que contiene todos los registros leídos en cada ciclo. Para poder trabajar con cada parámetro eléctrico por separado, es necesario interpretar esa trama y extraer las variables que corresponden a voltaje, corriente, potencias, frecuencia, factor de potencia, THD y energía.

Para este fin, se utiliza el nodo Buffer-Parser, que es esencial para deserializar la secuencia de bytes crudos recibida en el buffer. Este proceso permite convertir el flujo de datos binarios en valores legibles, especificando el tipo de dato (entero de 16bits, float), el offset y longitud del campo a leer y el orden de los bytes (Big Endian) utilizado por el analizador. De esta manera, la trama cruda se gestiona, ensambla y decodifica en un conjunto de variables individuales, cada una lista para continuar su procesamiento.

El uso del Buffer Parser garantiza que todos los datos del analizador sean interpretados correctamente antes de pasar a la siguiente etapa. A continuación, se puede ver su configuración en la imagen 3.6.

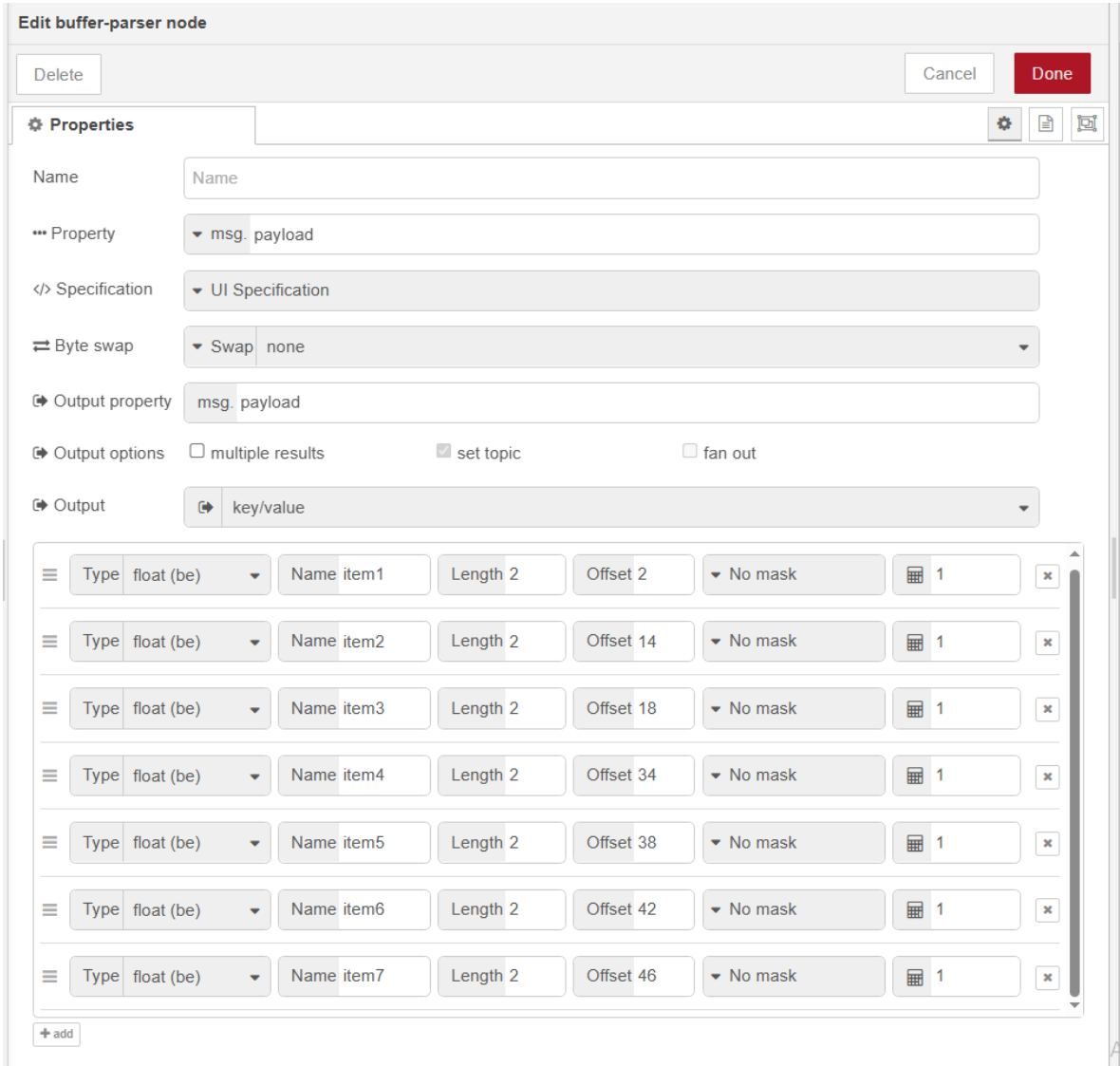


Imagen 3.6 - Configuración Buffer Parser

3.2.4. Procesamiento y Normalización de Registros Modbus mediante Nodo Function

Luego que el Buffer Parser decodifica la trama Modbus y genera en su salida el arreglo definido como *msg.values* para cada uno de los parámetros eléctricos, se aplica un proceso adicional de normalización, validación y estandarización antes de utilizar dichos valores en etapas posteriores del sistema. Para ello se emplea un nodo Function, el cual permite ejecutar lógica personalizada en lenguaje JavaScript dentro de Node-RED.

Para ejemplificar y generalizar, en este nodo se toma el primer elemento del arreglo (*msg.values*) correspondiente al valor previamente definido en la configuración del Buffer Parser (Voltaje). Este dato se convierte explícitamente a un número flotante utilizando *parseFloat(msg.values[0])* y luego se formatea a dos decimales mediante *toFixed(2)*, asegurando así un valor preciso. En caso de que el valor sea nulo o inválido, se asigna automáticamente un cero, evitando errores durante el procesamiento en el registro de la base de datos.

Posteriormente, *msg.value* se crea dentro del Nodo Function con el fin de almacenar el valor ya procesado y normalizado, actuando como un contenedor interno donde se guarda el dato limpio obtenido desde el arreglo *msg.values*.

Por otro lado, *msg.payload* corresponde a estándar utilizada por Node-RED para el intercambio de información entre nodos. Una vez que el valor se normaliza y almacena en *msg.value*, se asigna también a *msg.payload* para garantizar que los nodos posteriores como Modbus Write, cálculos, entre otros, puedan utilizar la información.

En conjunto, *msg.value* permite una gestión interna y ordenada de los datos procesados, mientras que *msg.payload* asegura su correcta propagación a lo largo del sistema.

De esta manera, el Function Node, que se puede visualizar en la imagen 3.7 cumple un rol fundamental, como procesar el valor crudo decodificado en un dato normalizado, validado y estructurado, apto para ser utilizado en el resto de la arquitectura del sistema de gestión energética.

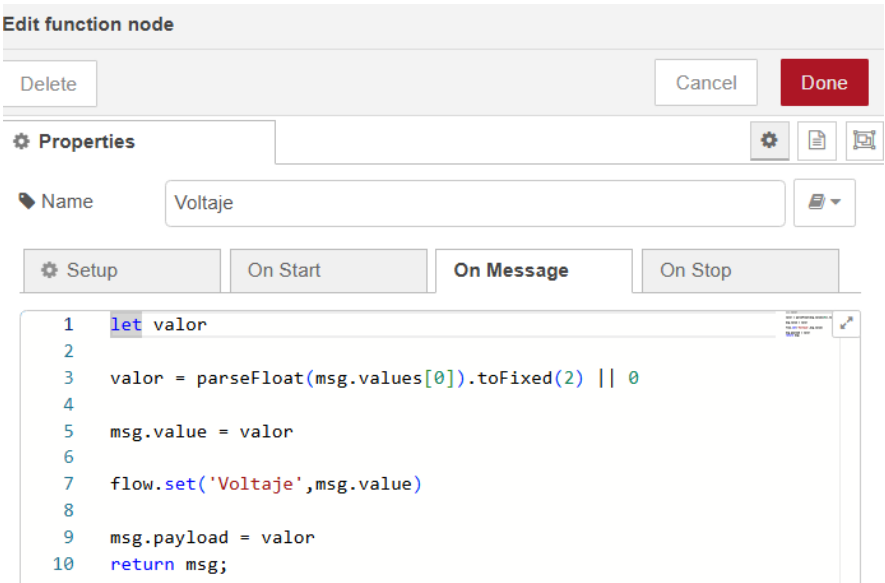


Imagen 3.7 - Function Node

Siguiendo la ejemplificación tomada con la variable Voltaje se obtiene como resultado la lectura de esta, debido a la configuración previamente detallada en el Nodo Function, quedando completamente normalizada en el flujo y disponible en *msg.payload* para ser utilizada directamente en las etapas siguientes del backend.

Este mismo procedimiento se aplica al resto de los parámetros adquiridos, como corriente, frecuencia, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, factor de potencia, THD y energía. Se modifica únicamente el índice del arreglo y el nombre asignado al valor almacenado en el contexto. Esto permite mantener un flujo homogéneo, ordenado y fácil de mantener para todas las señales capturadas desde el analizador.

3.2.5. Validación visual preliminar de las señales

Una vez normalizado cada parámetro mediante el Function Node, se realiza una validación visual preliminar utilizando nodos de visualización de Node-RED (indicadores tipo gauge). Esta etapa tiene como objetivo verificar que las señales procesadas coincidan con los valores mostrados por el analizador de red, asegurando que la lectura, decodificación y normalización se encuentren correctamente implementadas antes de avanzar a etapas posteriores del backend.

La visualización preliminar permite confirmar que las magnitudes obtenidas como voltaje, corriente, potencia activa, factor de potencia, frecuencia, THD y energía, respondan adecuadamente a variaciones reales del sistema, sin presentar errores de escala ni desfases respecto de las mediciones del equipo. Estas gráficas también facilitan la detección temprana de posibles inconsistencias en el mapeo de registros o en el procesamiento aplicado por los nodos anteriores.

Es importante destacar que estas visualizaciones, que se muestran en la imagen 3.8 no corresponden al frontend definitivo del sistema, sino que forman parte del proceso de verificación interna utilizado durante el desarrollo del flujo. Su propósito es exclusivamente validar la calidad de los datos antes de su almacenamiento en la base de datos y su posterior uso en los indicadores energéticos.



Imagen 3.8 - Visualización de variables en Node Red

3.2.6. Vista general del flujo completo de adquisición y procesamiento

Para complementar las etapas descritas anteriormente, se representa en la Imagen 3.9 la vista general del flujo implementado en Node-RED para la adquisición y tratamiento de las variables eléctricas. En esta representación se observa la secuencia completa de bloques que conforman el backend: la lectura Modbus desde el analizador, la

decodificación mediante Buffer Parser, la normalización realizada en los Function Nodes y la validación visual preliminar de las señales.

Esta vista integrada permite apreciar cómo cada etapa se encadena dentro del flujo, evidenciando la estructura modular utilizada en el diseño. Gracias a esta organización, cada componente cumple una función específica dentro del procesamiento de los datos, manteniendo un sistema coherente, ordenado y fácilmente escalable. El diagrama constituye, por tanto, una referencia visual del funcionamiento interno del backend antes del paso final de almacenamiento en base de datos.

Observación: En la figura se observan también nodos Modbus Write, los cuales forman parte de la estructura general del flujo. Estos son utilizados en etapas posteriores para enviar/escribir datos al PLC, pero no intervienen en el proceso de adquisición descrito en esta sección.

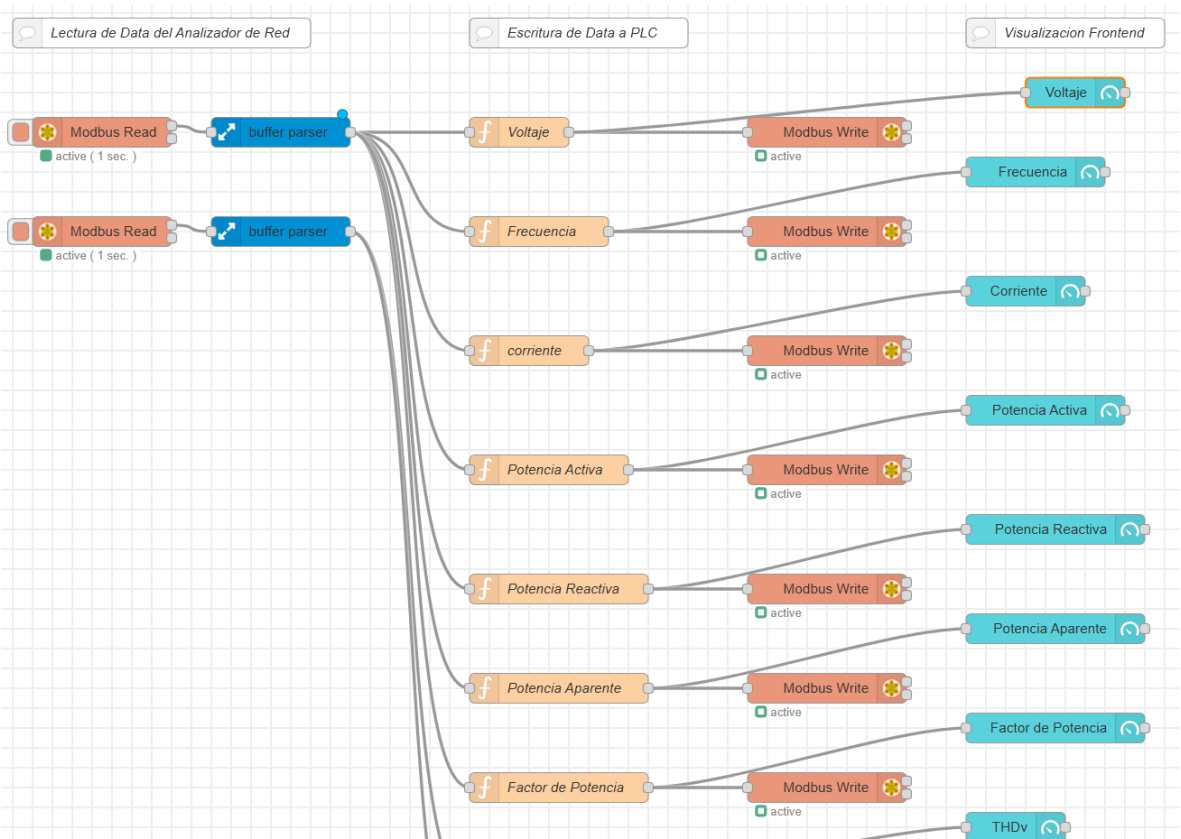


Imagen 3.9 - Flujo de Adquisición de datos en Node Red

3.3. Integración con la base de datos SQL Server Express

El backend del sistema requiere almacenar las mediciones eléctricas procesadas para mantener un registro continuo de datos y facilitar su consulta para análisis y visualización. Para este propósito se utiliza SQL Server Express, debido a su factibilidad de integración con Node-RED.

La configuración del servidor SQL se basa en la creación de una instancia local destinada al Sistema de Gestión de Energía (SGEn), junto con una base de datos y una tabla diseñadas para almacenar las variables eléctricas normalizadas. Una vez configurada la estructura de la base de datos, Node-RED se configura para realizar la inserción

automática y continua de los datos en esta tabla mediante nodos SQL, completando así el flujo del backend.

3.3.1. Configuración de la base de datos del SGEN

El proceso de configuración realizado permite disponer de una estructura para registrar, almacenar y gestionar las mediciones provenientes de Node-RED. Esta base de datos constituye el repositorio central del sistema, asegurando la trazabilidad de los parámetros eléctricos monitoreados y facilitando su posterior análisis.

El primer paso consiste en la creación de una nueva base de datos dentro del servidor SQL. Para ello, desde el Explorador de Objetos se seleccionó la opción “Nueva base de datos...”, tal como se muestra en la Figura 3.10.

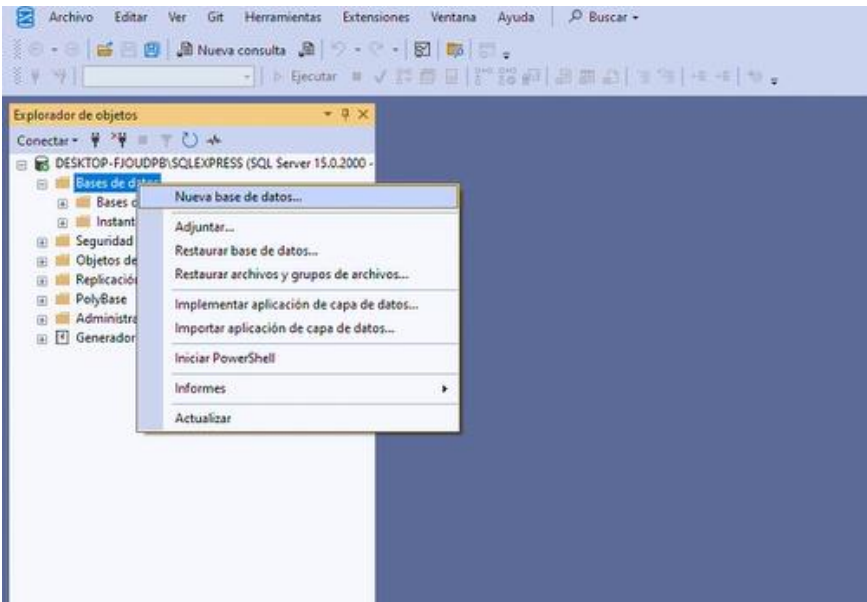


Imagen 3.10 - Base de datos SQL

En la ventana de creación se asigna el nombre y se realiza la parametrización inicial. En esta etapa también se definen manualmente los tamaños iniciales de los archivos internos que requiere SQL Server para operar: la base de datos principal (SGEn) y la tabla de registro de transacciones “SGEn.Log”. Para este proyecto se configura un tamaño inicial de 1007 MB para el archivo de datos y 400 MB para el archivo de registro, como se aprecia en la Imagen 3.11. Esta asignación permite contar con suficiente espacio disponible para almacenar mediciones de manera continua, evitando crecimientos automáticos frecuentes y contribuyendo a la estabilidad del sistema.

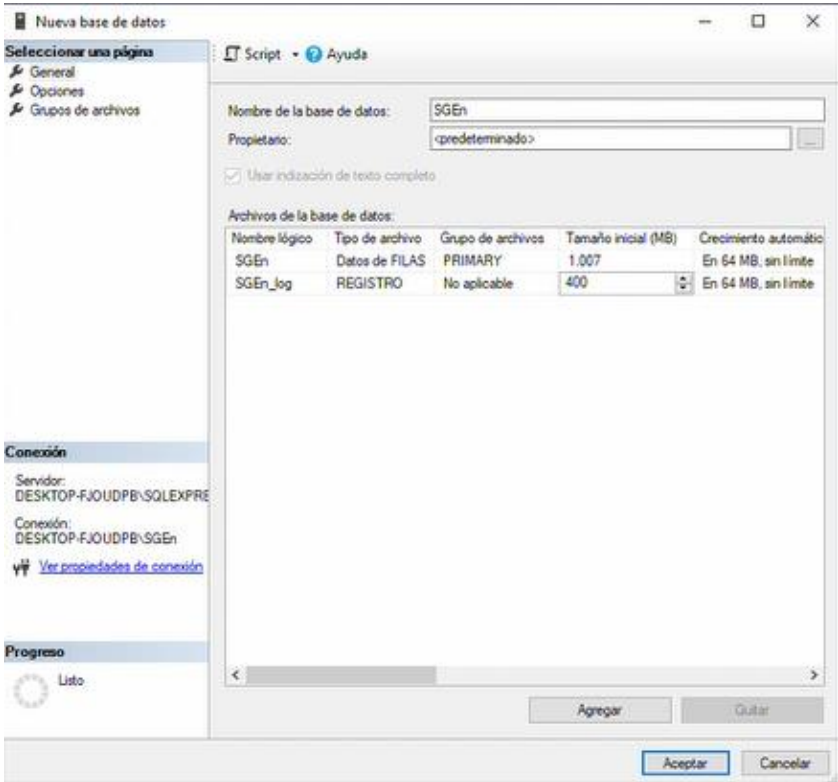


Imagen 3.11 - Nueva Base de Datos en SQL

Posteriormente, se revisan las opciones avanzadas de la base de datos. Entre los parámetros relevantes se encuentran la intercalación *Modern_Spanish_CI_AS*, el modelo de recuperación Simple (recomendado para bases con inserciones frecuentes) y el nivel de compatibilidad del motor SQL. Esta configuración se mantiene según los valores utilizados en la Imagen 3.12.

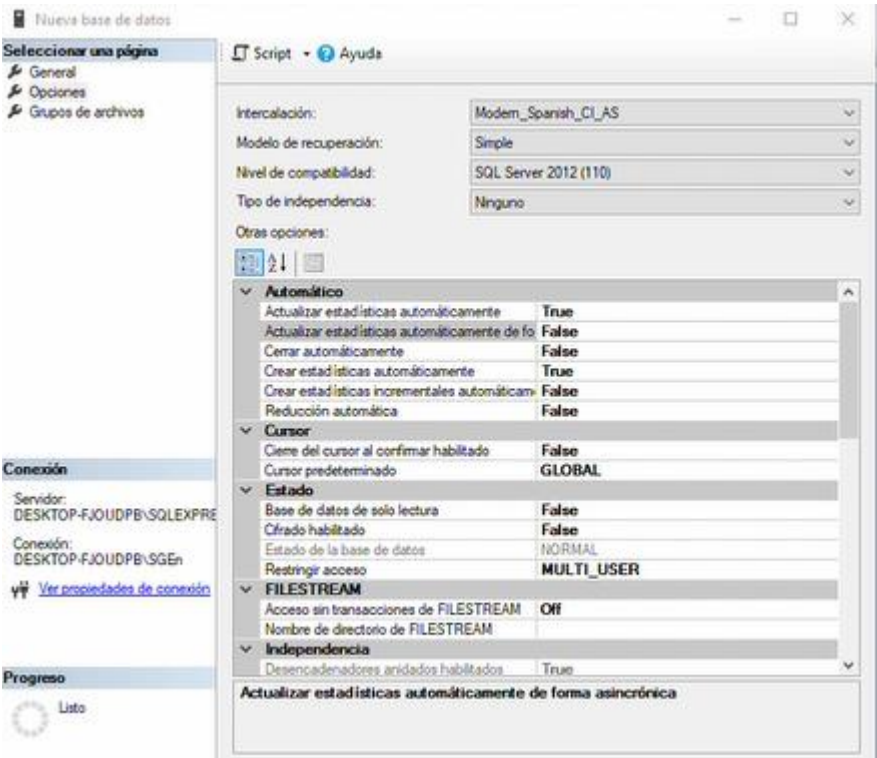


Imagen 3.12 - Configuración Base de Datos

Con la base creada, se procede a diseñar la estructura de almacenamiento de las mediciones energéticas. Para ello, dentro del menú Tablas, se selecciona la opción “*Nuevo → Tabla*”, lo que permite definir una tabla dedicada al registro de los datos provenientes del backend, tal como se muestra en la Imagen 3.13.

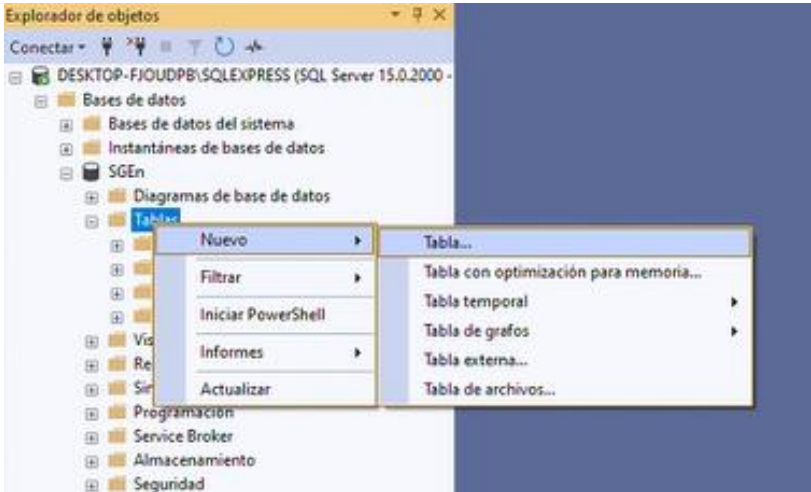


Imagen 3.13 - Tabla de Registros

Finalmente, la tabla se crea mediante un script SQL ejecutado desde la opción “*Nueva consulta*”. Este script define la estructura completa de la tabla “LogSGEn”, especificando cada una de las columnas que almacenarán las mediciones eléctricas procesadas en el backend. La primera columna, “*FechaHora*”, se declara tipo datetime y corresponde al momento exacto en que se recibe cada medición desde Node-RED.

A continuación, se definen los campos numéricos asociados a las variables eléctricas registradas por el sistema —voltaje, corriente, frecuencia, factor de potencia, potencia activa, potencia reactiva y potencia aparente, además de los índices de distorsión armónica THDv y THDi— todos ellos declarados tipo float, lo que facilita su inserción directa desde los valores normalizados generados en el backend.

Además, el script incorpora la columna “*RowID*”, definida como un identificador autonumérico mediante la propiedad “*IDENTITY(1,1)*”. Esta columna funciona como clave primaria de la tabla, lo que permite distinguir cada registro de manera única, asegurando el orden secuencial de las mediciones a medida que se almacenan. Esta clave también facilita las consultas históricas y la integración con herramientas de visualización. En la Imagen 3.14 se muestra el script completo utilizado para crear la tabla “LogSGEn”, donde se aprecia cada uno de los campos definidos, sus tipos de datos y la estructura final de la clave primaria.

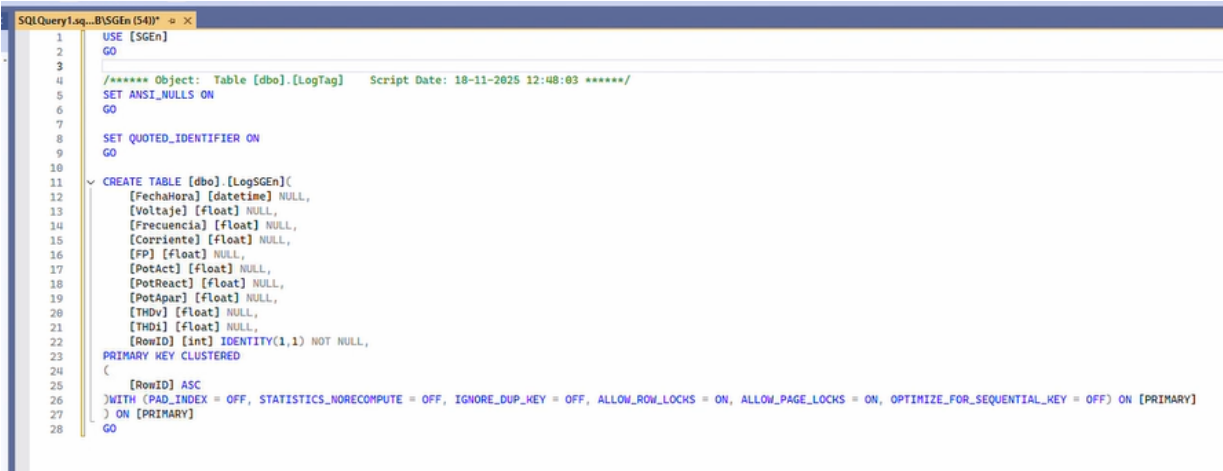


Imagen 3.14 - Script LogSGEn

Posteriormente, con la tabla ya creada, se genera el script mediante la opción “*Generar script de tabla como → CREATE TO → Nueva ventana del Editor*”, tal como se muestra en la imagen 3.15. Esta herramienta permite obtener el código exacto de la estructura creada en el servidor, garantizando que la definición utilizada coincida fielmente con el modelo implementado.

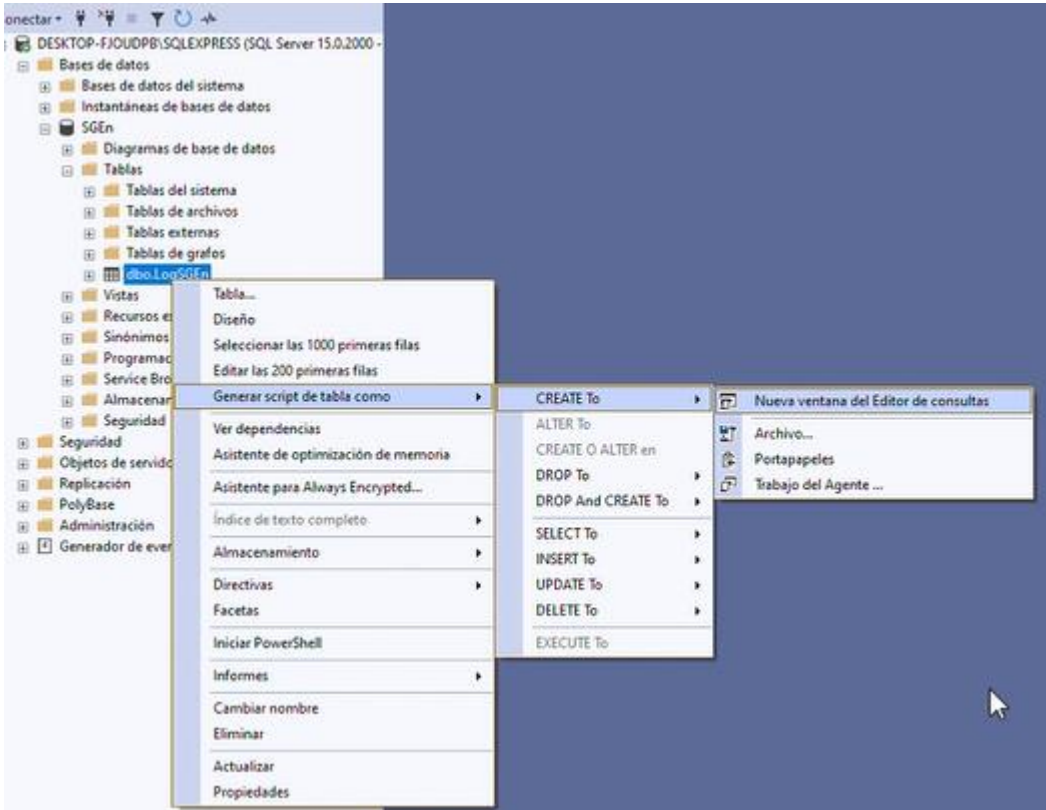


Imagen 3.15 - Editor de Consultas

Luego se verifica la tabla mediante la opción “*Seleccionar las 1000 primeras filas*”, confirmando que la estructura esta correctamente declarada y disponible para recibir datos, apareciendo inicialmente vacía, como se puede ver en la imagen 3.16.

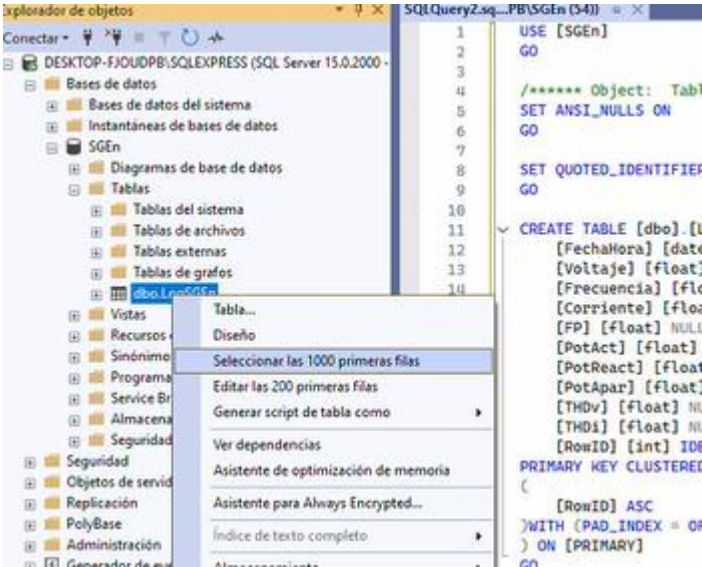


Imagen 3.16 - Editor de Consultas

Como validación adicional, se ejecuta una consulta SQL con la instrucción “*SELECT*”, lo que permite revisar directamente las columnas generadas y confirmar la correcta creación de cada campo definido en el script. La imagen 3.17 representa la consulta utilizada y el resultado obtenido.

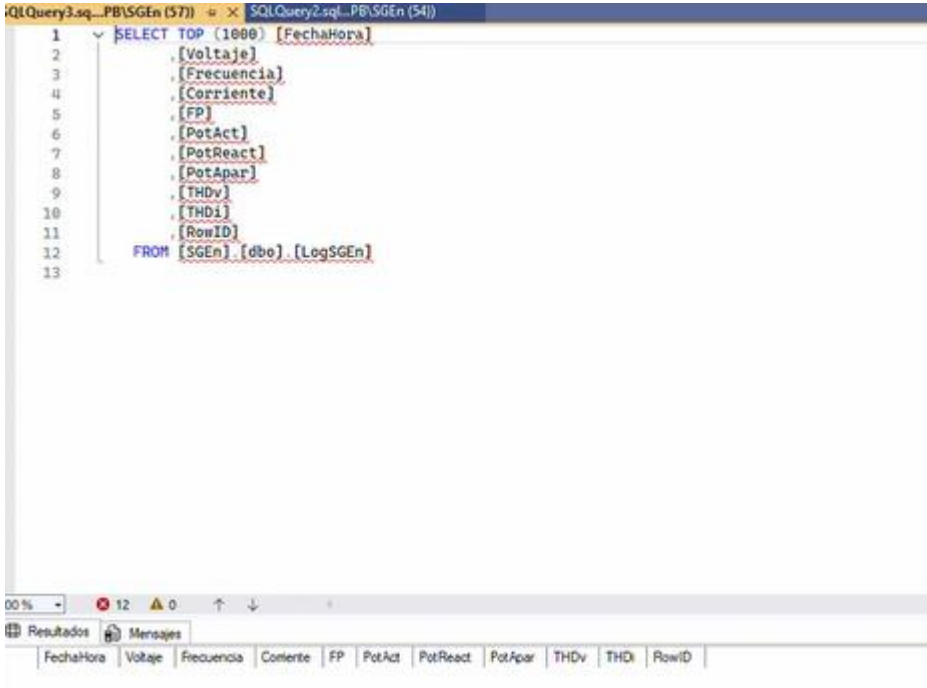


Imagen 3.17 - Visualización de Tabla

Para asegurar la compatibilidad con Node-RED y habilitar el acceso externo mediante autenticación SQL, se realiza la revisión de las propiedades del servidor. Desde SQL Server Management Studio, se accede a la ventana de propiedades de la instancia para identificar el nombre completo del servidor “DESKTOP-FJ0UDPB\SQLEXPRESS” y confirmar la configuración general del motor (Imagen 3.18)



Imagen 3.18 - Propiedades del Servidor

Como parte de esta configuración, se corrobora el estado del usuario interno “sa”. En su ventana de propiedades se define la contraseña correspondiente al proyecto “Tesis2025” y se habilita el inicio de sesión (Imagen 3.19). De esta manera, el usuario queda disponible para ser utilizado desde Node-RED.

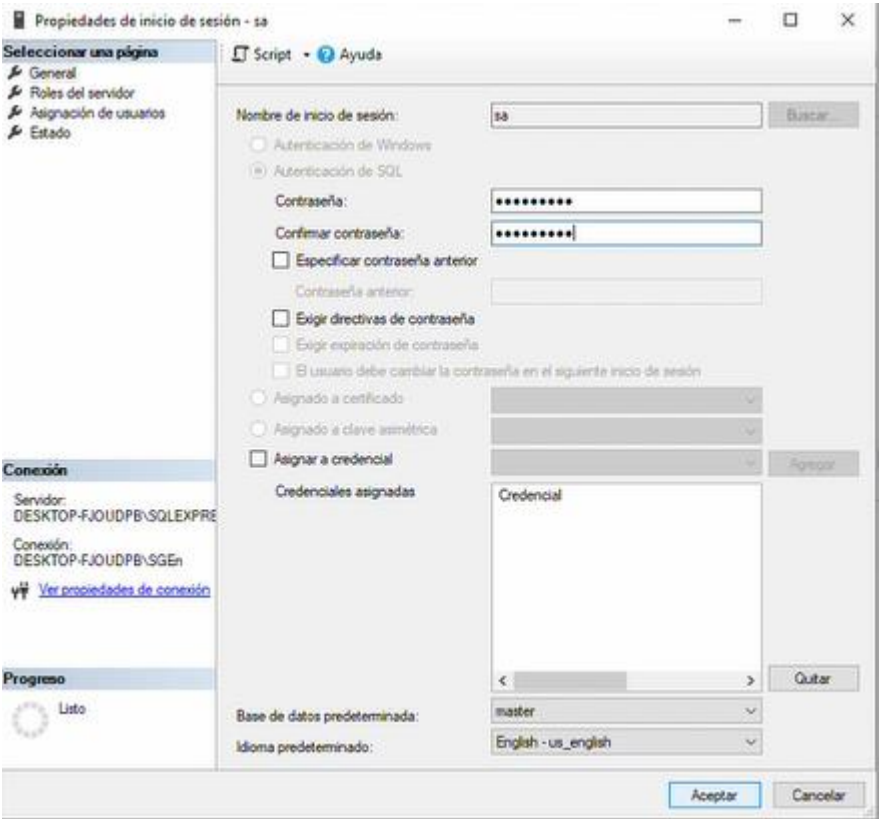


Imagen 3.19 - Inicio de Sesión usuario SQL

Finalmente, con el fin de habilitar por completo las conexiones remotas a la instancia SQLEXPRESS, se utilizan las herramientas de SQL Server Configuration Manager. Se verifican los servicios asociados al motor, asegurando que SQL Server “SQLEXPRESS” se encuentre en estado Running y que SQL Server Browser, necesario para anunciar la

instancia a clientes externos, se encuentre activo y configurado en modo Automatic, tal como se indica en las imágenes 3.20 y 3.21

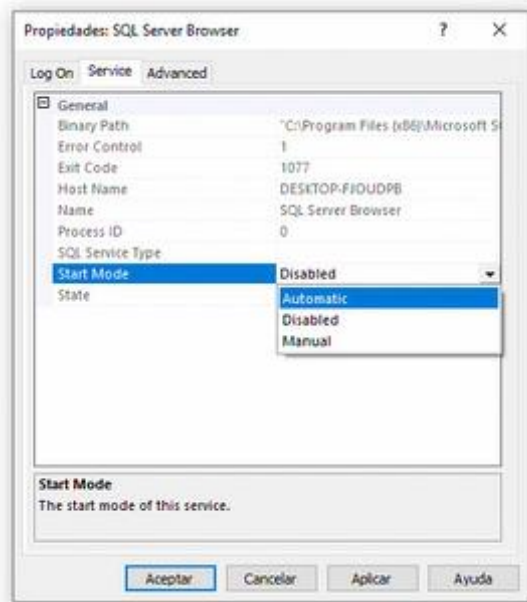


Imagen 3.20 - Start Mode SQL Server

Name	State	Start Mode	Log On As	Process ID	Service Type
SQL Server Browser	Running	Automatic	NT AUTHORITY\LO...	2264	
SQL Server (SQLEXPRESS)	Running	Automatic	NT Service\MSSQLS...	10388	SQL Server
Agente SQL Server (SQLEXPRESS)	Stopped	Other (Boot, Syste...	NT AUTHORITY\NE...	0	SQL Agent

Imagen 3.21 - Estado de Servicios SQL

Dentro del mismo administrador de configuración, señalado en la imagen 3.22, se habilita además el protocolo TCP/IP, indispensable para permitir conexiones vía puerto 1433 desde aplicaciones como Node-RED.

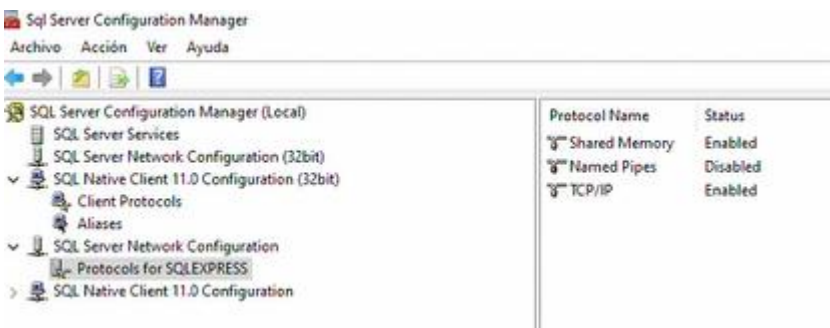


Imagen 3.22 - SQL Configuración TCP/IP

Aplicados estos ajustes, el servidor queda preparado para aceptar conexiones externas mediante el protocolo TCP/IP y autenticación SQL.

3.3.2. Configuración de la conexión MSSQL en Node-RED

Una vez finalizada la configuración del servidor SQL y habilitadas las credenciales de autenticación necesarias, se procede a establecer la conexión desde Node-RED mediante el nodo MSSQL Plus, el cual permite ejecutar consultas SQL directamente desde el flujo

del backend. Este nodo actúa como el puente entre la plataforma Node-RED y la base de datos SGen, posibilitando la inserción y gestión de datos en tiempo real.

a) Configuración del perfil de conexión (MSSQL CLIENTE):

El primer paso consiste en configurar el nodo MSSQL-CN, disponible dentro del paquete node-red-contrib-mssql-plus. En este nodo se crea un nuevo perfil de conexión donde se especifican los parámetros del servidor SQL Server Express configurado en la etapa anterior. La configuración se muestra en la Imagen 3.23.

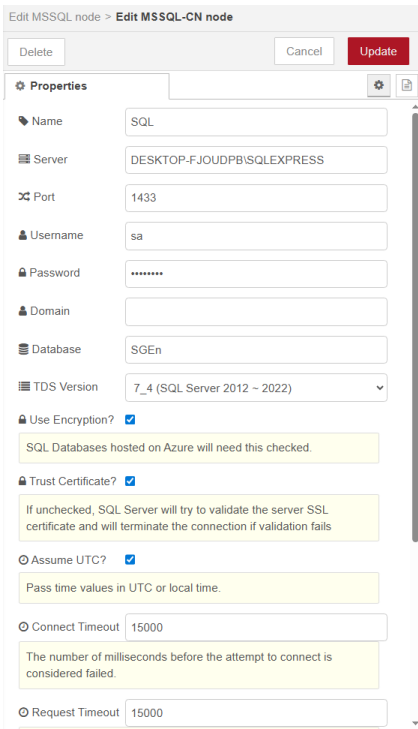


Imagen 3.23 - Config. Cliente MSSQL Node Red

Parámetros configurados:

- Server: DESKTOP-FJ0UDPB\SQLEXPRESS
- Port: 1433
- Username: sa
- Password: Tesis2025
- Database: SGen
- TDS Version: 7.4
- Use Encryption: Activado
- Trust Certificate: Activado
- Assume UTC: Activado
- Connect Timeout: 15000 ms
- Request Timeout: 15000 ms

Esta configuración permite que Node-RED establezca una conexión cuando se realice la solicitud con SQL Server utilizando autenticación SQL.

b) Configuración del nodo ejecutor de consultas

Una vez establecido el perfil de conexión, se realiza la configuración del nodo encargado de ejecutar las consultas SQL dentro del flujo: el nodo MSSQL. Este nodo recibe la instrucción SQL generada en el bloque Function y la envía directamente al servidor. Su configuración se muestra en la Imagen 3.24.

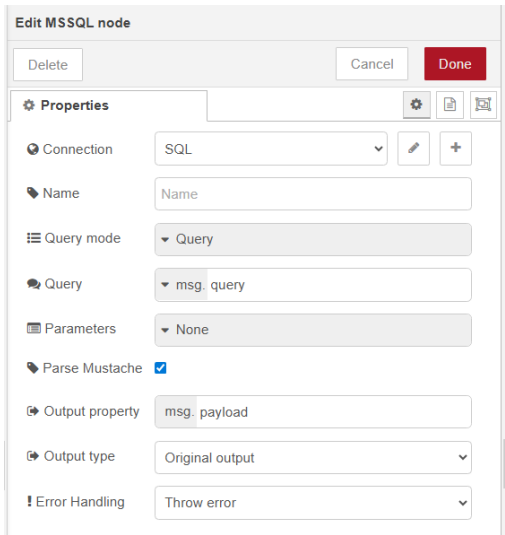


Imagen 3.24 - MSSQL Node

Parámetros configurados:

- Connection: SQL (perfil creado previamente)
- Query mode: Query
- Query: msg.query
- Output property: msg.payload
- Error Handling: Throw error

Gracias a esta configuración, el nodo MSSQL queda listo para recibir instrucciones SQL dinámicas y ejecutar operaciones de inserción sobre la tabla LogSGEn.

c) Nodo Function para la generación de la instrucción SQL

Antes de llegar al nodo MSSQL, se incorpora un nodo Function encargado de armar la consulta y entregarla como un string que es consumido por el módulo MSSQL PLUS, donde el código indicado en este nodo se ve reflejado en la tabla “LogSGEn” de la base de datos SGen. En este bloque se insertan las variables normalizadas almacenadas en el contexto del flujo y se forma la consulta completa, tal como se muestra en la Imagen 3.25.

```
1 let voltaje = flow.get('Voltaje')
2 let frecuencia = flow.get('Frecuencia')
3 let corriente = flow.get('Corriente')
4 let fp = flow.get('FP')
5 let potact = flow.get('PotAct')
6 let potreact = flow.get('PotReact')
7 let potapar = flow.get('PotApar')
8 let thdv = flow.get('THDv')
9 let thdi = flow.get('THDi')
10
11 var query = ""
12
13 query = `
14 USE [SGEn]
15 INSERT INTO [dbo].[LogSGEn]
16     ([FechaHora]
17     ,[Voltaje]
18     ,[Frecuencia]
19     ,[Corriente]
20     ,[FP]
21     ,[PotAct]
22     ,[PotReact]
23     ,[PotApar]
24     ,[THDv]
25     ,[THDi])
26     VALUES
27     (GETDATE()
28     ,` + voltaje + `
29     ,` + frecuencia + `
30     ,` + corriente + `
31     ,` + fp + `
32     ,` + potact + `
33     ,` + potreact + `
34     ,` + potapar + `
35     ,` + thdv + `
36     ,`
37 `
38 msg.payload = query;
39 msg.query = query;
40 return msg;
```

Imagen 3.25 - Function Node

- En términos generales, el código realiza las siguientes acciones:
- 1. Lectura de variables normalizadas: se obtienen desde el contexto de flujo (flow.get) las magnitudes de voltaje, frecuencia, corriente, factor de potencia, potencias activa, reactiva y aparente, además de THDv y THDi.
 - 2. Construcción de la consulta: se arma una instrucción SQL del tipo INSERT INTO [dbo].[LogSGEn] (...) VALUES (...), donde se incluye la marca temporal con GETDATE() y cada una de las variables leídas.
 - 3. Asignación al mensaje: la consulta resultante se asigna a msg.query (y también a msg.payload), de modo que el nodo MSSQL pueda ejecutarla directamente.

d) Nodo Inject como temporizador de escritura

El Nodo Inject permite que cada inserción de registros almacenados en SQL Server incluya una estampa de tiempo (timestamp) que permite ordenar y analizar los parámetros de manera temporal. La configuración del nodo Inject se realiza como se muestra en la Imagen 3.26.

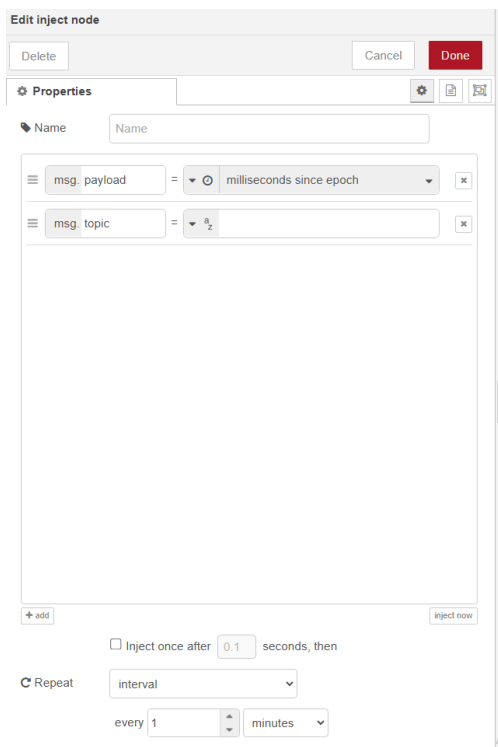


Imagen 3.26 - Inject node

Las principales características de este nodo son:

- Genera un mensaje (msg) cada 1 minuto, utilizando la opción “Repeat → interval → every 1 minute”.
- El campo “msg.payload” se inicializa con una marca de tiempo en milisegundos, modo “milliseconds since epoch”, aunque su contenido no se utiliza en la consulta; su función es simplemente activar el flujo.
- Permite también ejecutar el ciclo de forma manual mediante el botón “inject now”, útil para pruebas y validaciones.

Con esta configuración, el sistema ejecuta automáticamente la generación y envío de la instrucción INSERT con la periodicidad definida.

e) Estructura general del flujo de Registro y validación en SQL Server

El flujo completo de Node-RED encargado de registrar datos en SQL Server se compone de tres elementos:

1. Nodo Inject → genera la estampa de tiempo, cada 1 minuto.
2. Nodo Function → construye dinámicamente la instrucción SQL utilizando los parámetros normalizados almacenados en el flujo.
3. Nodo MSSQL → ejecuta la sentencia INSERT sobre la tabla LogSGEn.

Esta secuencia se aprecia de forma integrada en la Imagen 3.27, donde se observa el recorrido completo desde la estampa de tiempo hasta la ejecución de la consulta.

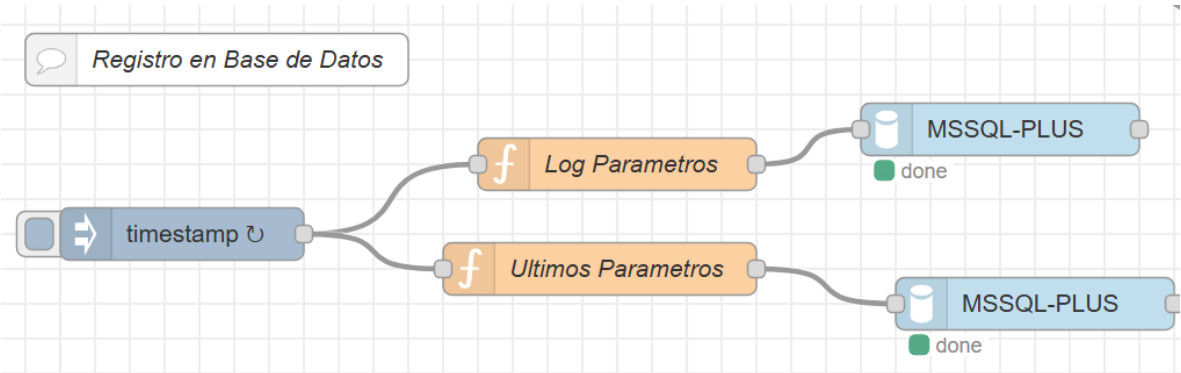


Imagen 3.27 - Estructura General del Flujo de Registro en Base de Datos en Node-Red

Para confirmar que el flujo se encuentra operando correctamente, se verifican directamente los registros almacenados en la tabla “LogSGEn”, obteniendo los resultados mostrados en la Imagen 3.28. En ellos se observan:

- Marcas de tiempo secuenciales generadas por “GETDATE()”.
- Valores de voltaje, corriente, frecuencia, potencias, factor de potencia y distorsión armónica coherentes con las mediciones originales.
- Incremento continuo del campo “RowID”, lo que confirma la inserción periódica de cada nuevo registro.

Estos resultados verifican que el backend está insertando datos de manera estable y continua, completando correctamente el proceso de almacenamiento histórico del SGen.

```
SELECT TOP (1000) [FechaHora]
, [Voltaje]
, [Frecuencia]
, [Corriente]
, [FP]
, [PotAct]
, [PotReact]
, [PotApar]
, [THDv]
, [THDi]
, [RowID]
FROM [SGEn].[dbo].[LogSGEn]
ORDER BY [RowID] desc
```

	FechaHora	Voltaje	Frecuencia	Corriente	FP	PotAct	PotReact	PotApar	THDv	THDi	RowID
1	2025-12-01 17:43:20.467	227	49.97	45.25	0.87	9.02	5.04	10.34	3.1	12.1	10225
2	2025-12-01 17:42:20.093	227	49.92	45.25	0.87	8.97	5.07	10.32	3.1	12	10224
3	2025-12-01 17:41:20.090	226	49.85	45	0.87	8.85	5	10.19	3	12.3	10223
4	2025-12-01 17:40:20.093	226	50.2	45	0.87	8.91	5.06	10.24	3	12.2	10222
5	2025-12-01 17:39:20.100	226	50.13	45	0.87	8.92	5.01	10.19	3.1	12	10221
6	2025-12-01 17:38:20.127	226	50.04	45.25	0.87	8.93	5.04	10.25	3.2	12.1	10220
7	2025-12-01 17:37:20.263	227	50.13	45.25	0.87	9.01	5.03	10.32	3.1	12.3	10219
8	2025-12-01 17:36:20.100	226	50.19	45	0.87	8.9	5.01	10.21	3.1	11.9	10218
9	2025-12-01 17:35:20.090	227	50.14	45.25	0.87	8.97	5.06	10.27	3.3	12.5	10217

Imagen 3.28 - Verificación de Consulta de Registros en Base de Dato

3.4. Integración con PLC Modicon M221

La integración entre Node-RED y el PLC M221 constituye el enlace que permite incorporar las variables eléctricas medidas por el medidor Phoenix Contact dentro de la lógica del controlador. La comunicación se establece mediante Modbus TCP, donde Node-RED opera como cliente maestro y escribe magnitudes eléctricas procesadas — tensión, corriente, factor de potencia, potencias y distorsión armónica— en registros %MW del PLC. A su vez, el PLC envía hacia Node-RED valores del proceso, como producción y estados de alarma, los cuales se registran en SQL.

El PLC incorpora además una variable simulada de toneladas producidas, utilizada para validar el cruce entre datos energéticos y productivos, permitiendo probar la sincronización de la plataforma sin depender de información real del proceso. Esta simulación se integra al flujo de datos del sistema del mismo modo que una señal proveniente de campo.

Para soportar este intercambio, el PLC mantiene registros %MW definidos tanto para recibir las variables eléctricas como para entregar la producción simulada. Node-RED, mediante nodos Modbus Read y Modbus Write, completa el flujo bidireccional y consolida la información necesaria para la gestión del sistema. Con esta base de comunicación establecida, la siguiente sección desarrolla la lógica de alarmas energéticas implementada.

3.4.1. Programación de alarmas en el PLC y envío a Node-RED

La implementación de la lógica de alarmas es fundamental para detectar oportunamente condiciones anómalas de los parámetros eléctricos en el SGen. Esto permite identificar desviaciones que puedan comprometer el desempeño de la eficiencia energética, proporcionando medidas preventivas para mantener la continuidad y seguridad del proceso.

La configuración de la lógica de alarmas se realiza en el software EcoStruxure Machine Expert Basic (ESME Basic), utilizando como base los parámetros eléctricos enviados desde Node-RED hacia el controlador lógico programable Modicon M221 de Schneider Electric. Una vez en el PLC, se programan condiciones y verifican los estados de las alarmas, donde los estados de las alarmas fueron enviados nuevamente a Node-RED para su correspondiente lectura. Finalmente, esta información fue acondicionada en Node-RED con el objetivo de registrar en la base de datos SQL.

3.4.1.1. Acondicionamiento en Nodo Function Para Escritura de Registros Modbus.

Para el envío de los parámetros hacia el PLC, se requiere un acondicionamiento previo, la variable declarada “valor” fue asignada a msg.payload, siendo este el valor que procesa el nodo Modbus-Write, como se indica en la imagen 3.29.

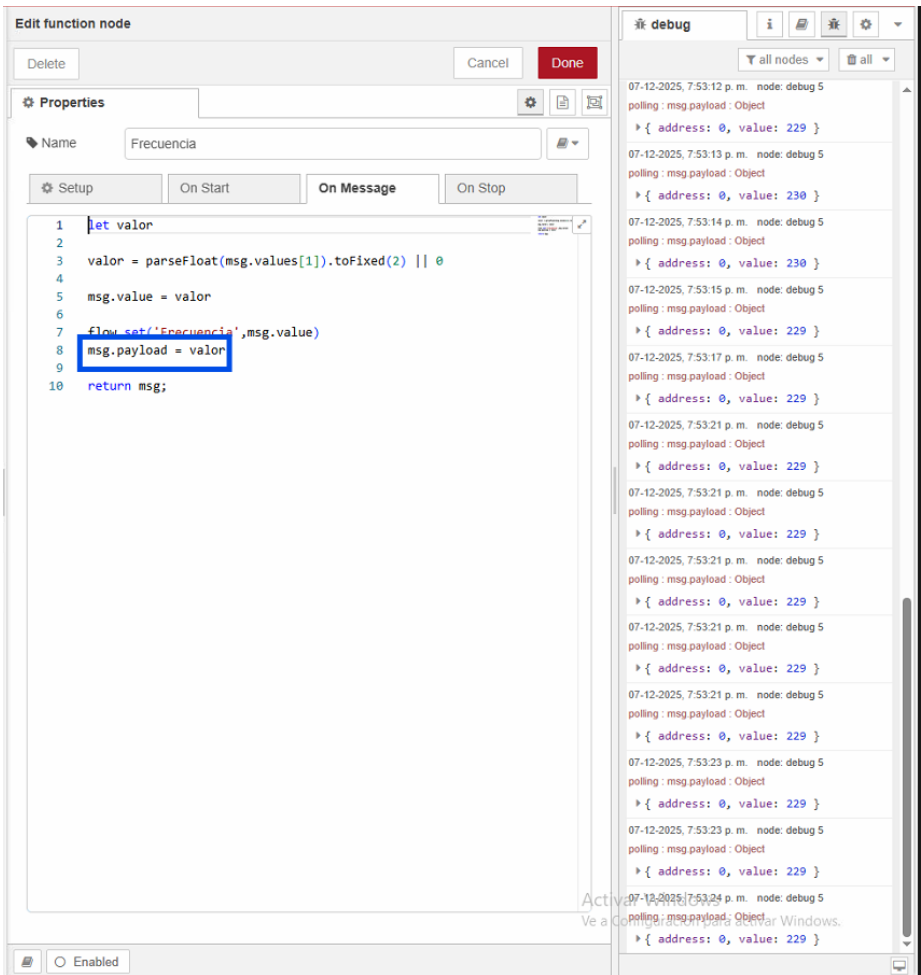


Imagen 3.29 - Function node

3.4.1.2. Escritura de parámetros desde Node-Red hacía PLC

El nodo Modbus Write se encarga de establecer la comunicación mediante protocolo TCP/IP y realizar la escritura de los parámetros al PLC Modicon M221 de Schneider Electric. Para ello, se realiza la configuración por separado de cada nodo de escritura perteneciente a cada una de las variables, definiendo el PLC como cliente Modbus TCP, especificando su dirección IP (192.168.2.130), el puerto estándar 502 y el Unit-ID. Esta configuración permite que Node-RED pueda comunicarse con el PLC, habilitando la configuración del direccionamiento de los parámetros requeridos para la lógica de alarmas. El tiempo de escaneo de parámetros se realiza de acuerdo con la configuración en el nodo de lectura, como se indica en la Imagen 3.30 que es de 1 segundo.

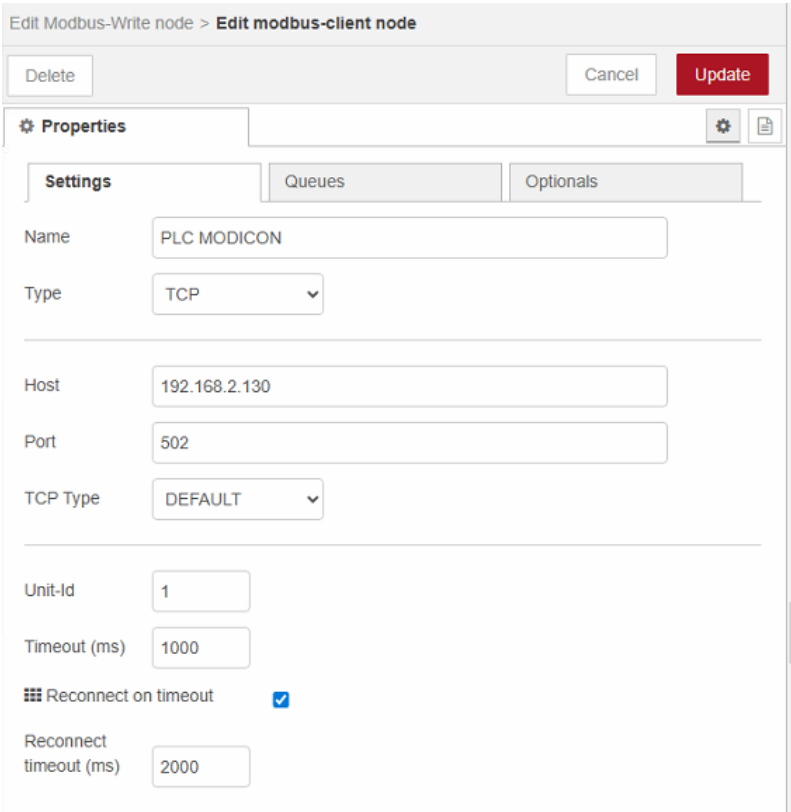


Imagen 3.30 - Config. Modbus Write

Como se indica en la imagen 3.31, en la configuración de cada nodo Modbus Write se direcciona un registro independiente del PLC, utilizando la función FC6: Preset Single Register, la cual permite escribir un único Holding Register por operación. Se configura el Unit-ID = 1, correspondiente al PLC, y se definen las direcciones de los registros de escritura como Memory Word (Entero de16bits), de acuerdo con la estructura del PLC Modicon M221. Para ejemplificar y generalizar, el valor del parámetro Voltaje se escribe en la dirección 0 correspondiente al registro %MW0 y así sucesivamente para los demás parámetros. Este direccionamiento permite mantener cada variable en un registro separado y evitar solapamientos en la memoria del PLC.

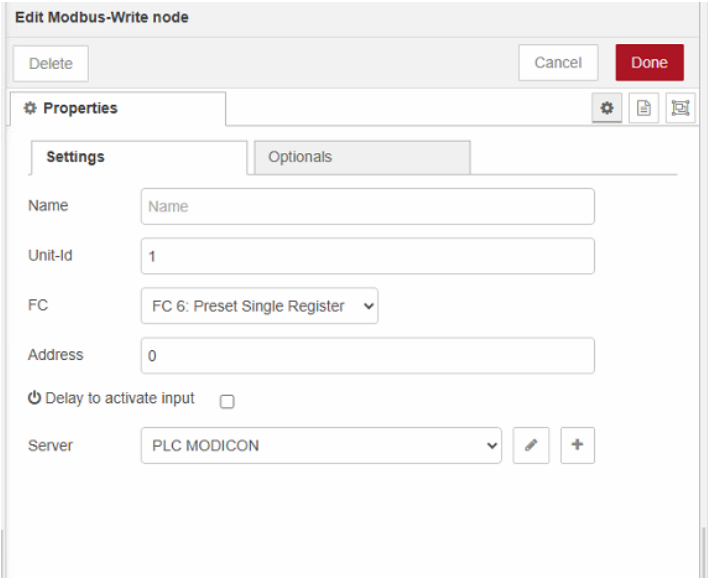


Imagen 3.31 - Propiedades Modbus Write node

Para la verificación de los registros desde Node-red al PLC configurados en los nodos Modbus Write de cada parámetro, se establece la comunicación con el PLC mediante el software ModScan usando protocolo Modbus TCP/IP, visualizado en la imagen 3.32, ingresando la dirección IP del PLC (192.168.2.130) y el puerto estándar 502. Esta configuración permite iniciar la comunicación y validación de los registros.

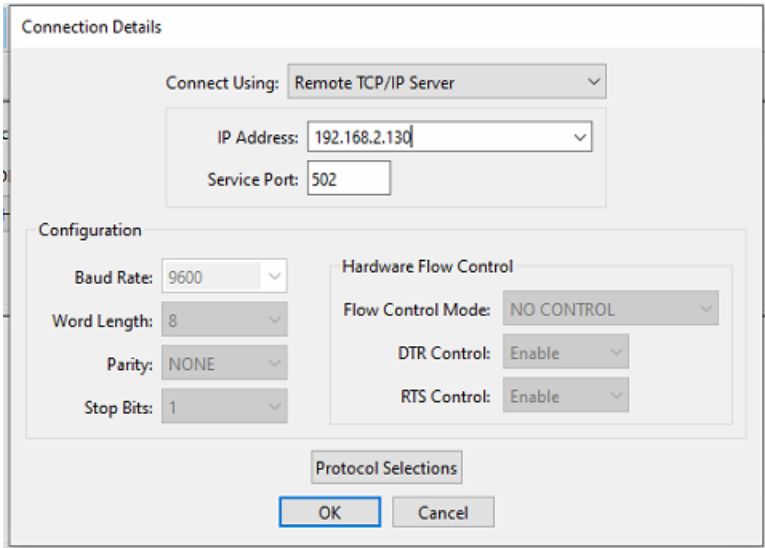


Imagen 3.32 - Validación con ModScan

Por consiguiente, el Software ModScan se utiliza como maestro para poder validar el envío de datos hacia el PLC. Durante la verificación en ModScan, el software se configura con direccionamiento base uno (1-based). El primer registro válido es 40001, que en el PLC Modicon M221 se asocia al registro %MW0. A continuación en la imagen 3.33, se presenta la verificación de los Registros Modbus en el maestro, de acuerdo con el direccionamiento previamente configurado en cada nodo Modbus Write de Node-Red.

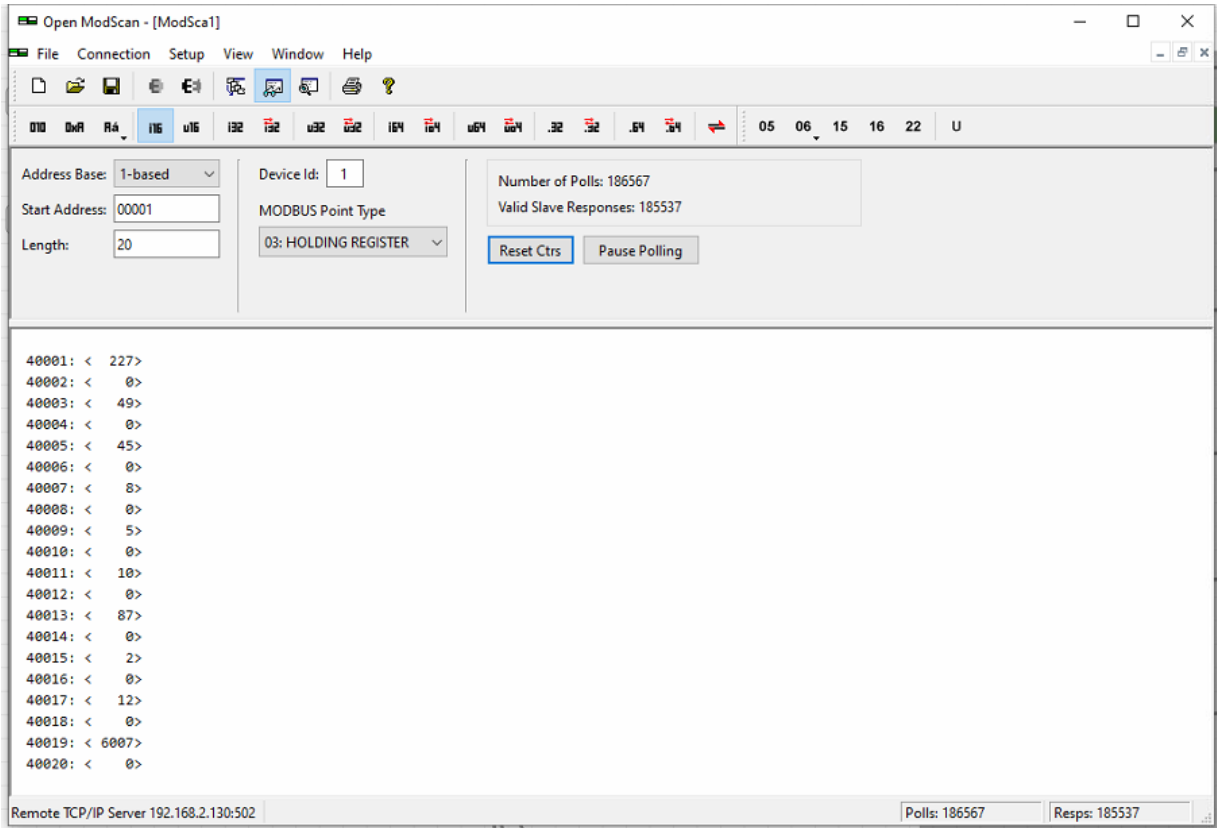


Imagen 3.33- Verificación de Registros en ModScan

En paralelo, para validar la correcta escritura de cada parámetro enviado desde Node-RED, se realiza la verificación en el software EcoStruxure Machine Expert Basic del PLC Modicon M221. A través de una tabla de animación es posible observar en tiempo real los valores de los registros enteros %MW, señalados en la imagen 3.34, confirmando que cada variable se recibe en la dirección configurada y con el valor correspondiente a la medición. Esta verificación permite asegurar la integridad de los datos antes de implementar la lógica de alarmas dentro del PLC.

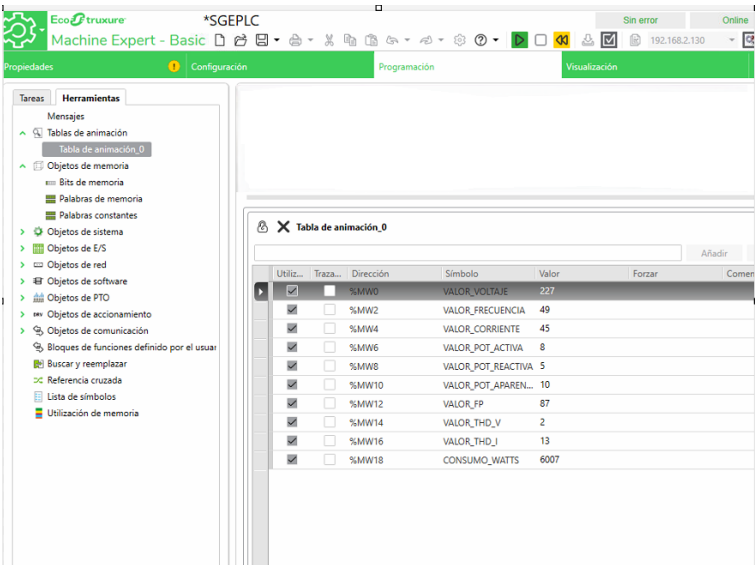


Imagen 3.34 - Visualización Tabla de Animación Machine Expert

En la tabla 3.2 se describen los resultados del proceso de escritura de variables desde Node-Red hacia el PLC, mostrando la dirección y el detalle de cada registro utilizado para la lógica de alarmas.

Tabla 3.2 - Dirección Modbus de Variables Eléctricas

Variable eléctrica	Tipo de dato	Dirección Modbus	Direccion PLC	Unidad
Voltaje fase–neutro	Int 16-bit	40001	MW0	V
Frecuencia	Int 16-bit	40003	MW2	A
Corriente	Int 16-bit	40005	MW4	Hz
Potencia activa	Int 16-bit	40007	MW6	kW
Potencia reactiva	Int 16-bit	40009	MW8	kvar
Potencia aparente	Int 16-bit	40011	MW10	kVA
Factor de potencia	Int 16-bit	40013	MW12	—
HD de voltaje	Int 16-bit	40015	MW14	%
THD de corriente	Int 16-bit	40017	MW16	%
Energía activa acumulada	Int 16-bit	40019	MW18	Wh

Finalmente, para complementar la configuración de escritura hacia el PLC, se presenta en la imagen 3.35 la ubicación de los nodos Modbus Write en el flujo general de la adquisición de los parámetros eléctricos en Node-RED. En esta representación se observa la secuencia completa de bloques que conforman la escritura Modbus.

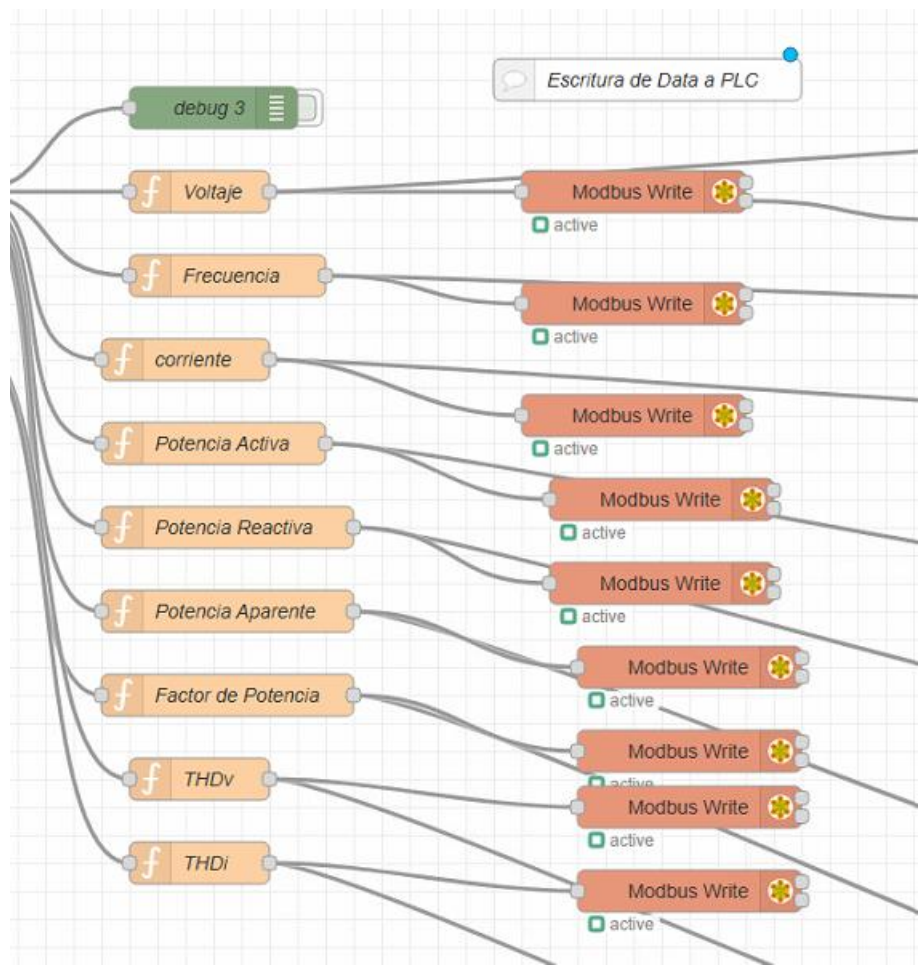


Imagen 3.35 - Nodos Modbus Write

3.4.1.3. Programación de la lógica de alarmas en PLC Modicon M221

Para la implementación de la lógica de alarmas correspondiente a cada variable eléctrica, la programación se realiza en lenguaje Ladder en el Software EcoStruxure Machine Expert Basic, definiendo una tarea/rutina que contiene la lógica de cada parámetro, a la cual se le asigna el nombre “ALARMAS” con su respectivas condiciones de activación.

En cada condición, se compara el valor recibido desde Node-RED con el límite establecido como criterio de alarma. Cuando la condición se cumple, el PLC activa un bit asociado en la memoria %M, el cual posteriormente es enviado a Node-RED para su lectura y registro en la base de datos.

A continuación, se describen las principales alarmas programadas:

- Alarma de voltaje: Si supera el límite establecido 242 V o es inferior a 198 V, se activa el bit %MW100.X0 cumpliendo la condición de alarma

- Alarma de frecuencia: Si supera el límite establecido ≥ 51 Hz, se activa el bit %MW101.X0 cumpliendo la condición de alarma.
- Alarma de corriente: Si supera el límite establecido ≥ 60 A o ≤ 2 A, se activa el bit %MW102.X0 cumpliendo la condición de alarma.
- Alarma de Factor de Potencia (FP): El FP se encuentra en un rango de cero a uno, por lo que se convierte de entero(%MW12) a flotante(%MF20). Para operar con decimales, se realiza la siguiente programación:

Se realiza la multiplicación de valor entero por 100, antes de ser enviado al PLC. Posteriormente la conversión de INT a REAL mediante el bloque INT_TO_REAL, almacenando el resultado en %MF20(Flotante). Finalmente, se divide el valor flotante entre 100, recuperando el valor real del FP como se indica en la imagen 3.36.

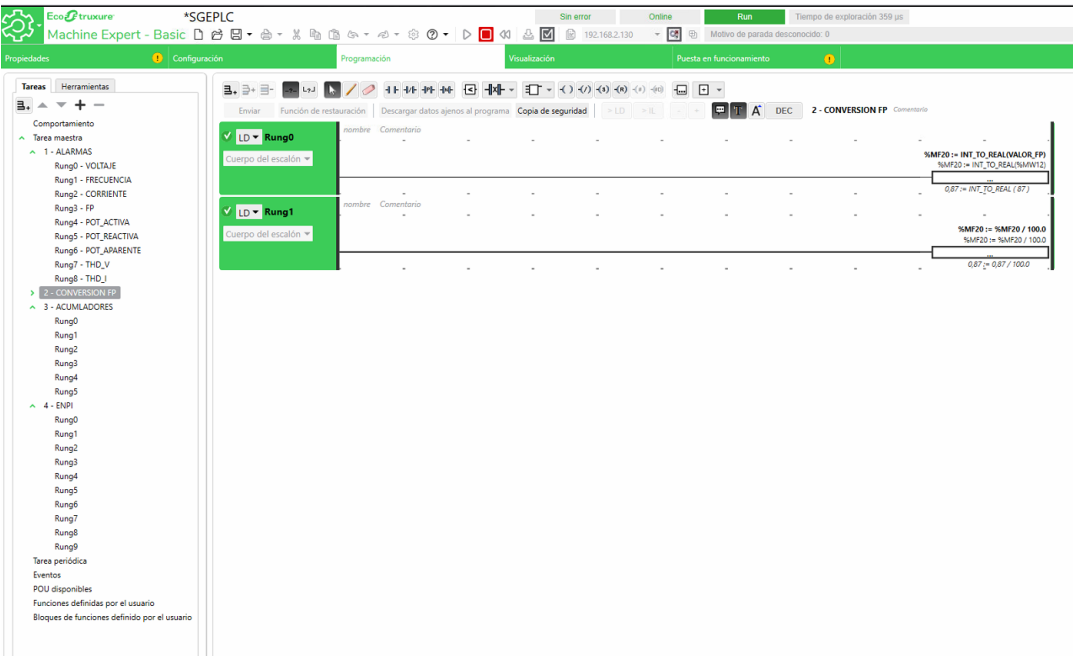


Imagen 3.36 - Normalización señal FP Machine Expert

Para el factor de potencia se realiza una alarma que se activa cuando el valor de F.P disminuye por debajo de 0.93, activándose el bit %MW103.X0.

- Alarmas de Potencia Activa, Reactiva y Aparente: Cada parámetro tiene su propio límite establecido. (Activa ≥ 10 , Reactiva ≥ 4 , Aparente ≥ 11), activándose los bits correspondientes (Activa: %MW104.X0, Reactiva: %MW105.X0 Y Aparente: %MW106.X0).
- Alarmas de Distorsión Armónica Total (THD-V y THD-I): Si el valor de distorsión armónica supera los límites de referencia típicos (THD-V ≥ 8 % Y THD-I ≥ 35 %), se activan los bits correspondientes a la alarma asociada (THD-V: %MW107.X0, THD-I: %MW108.X0).

Para cada caso se activa un bit de salida en memoria %M del PLC, el cual representa el estado de la alarma. Finalmente, se presenta la estructura de la configuración de la lógica de alarmas en la imagen 3.37.

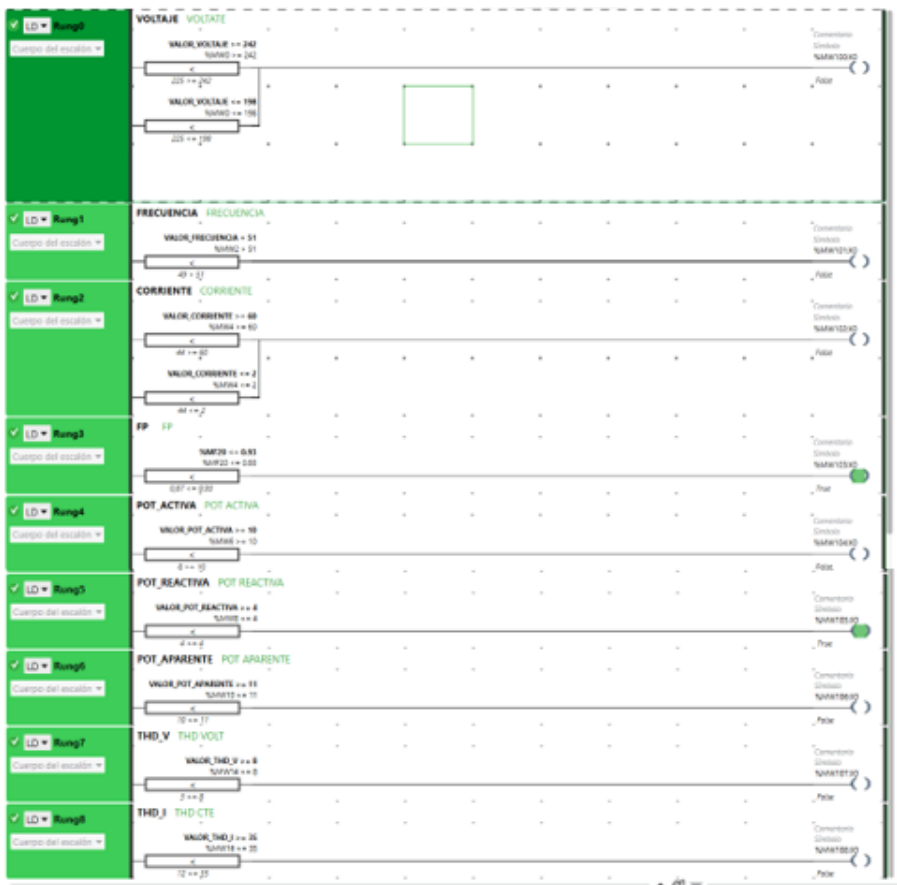


Imagen 3.37 - Lógica de Alarmas en PLC

3.4.1.4. **Lectura de Alarmas desde PLC hacia Node-Red**

Después de verificar mediante pruebas internas en el programa del PLC la activación de las salidas (imagen 3.38), así como también la verificación del estado de los bits mediante ModScan (imagen 3.39), se configura en Node-RED el nodo Modbus Read, encargado de establecer la comunicación TCP/IP con el PLC Modicon M221.

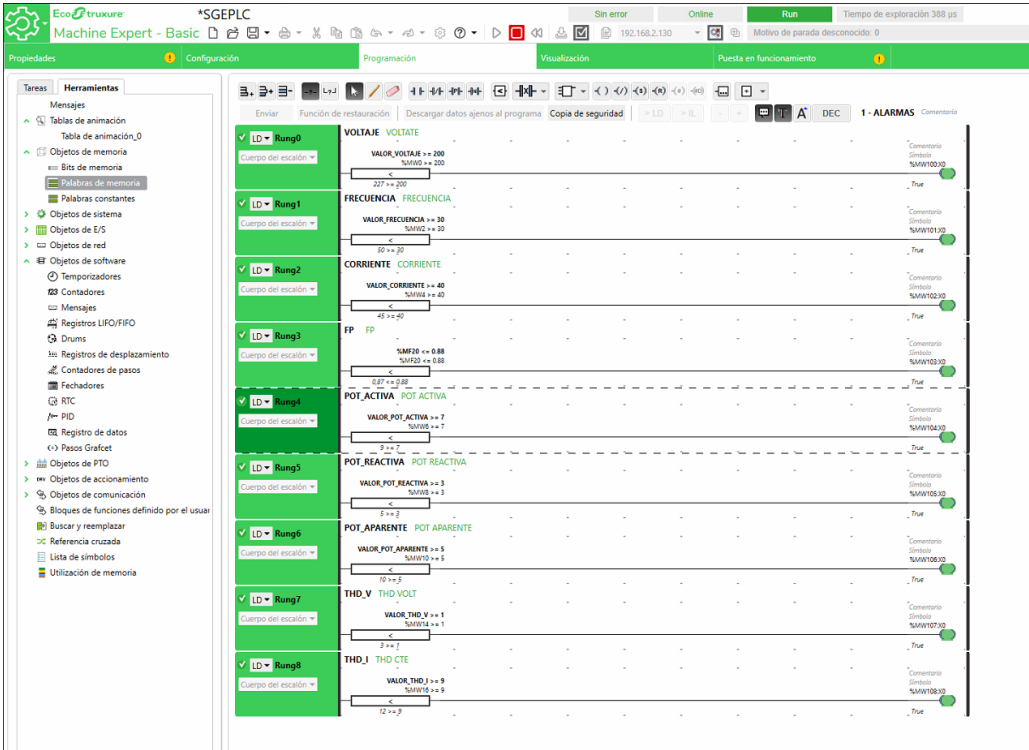


Imagen 3.38 - Visualización de segmentos de alarmas en EcoStruxure Machine Expert Basic

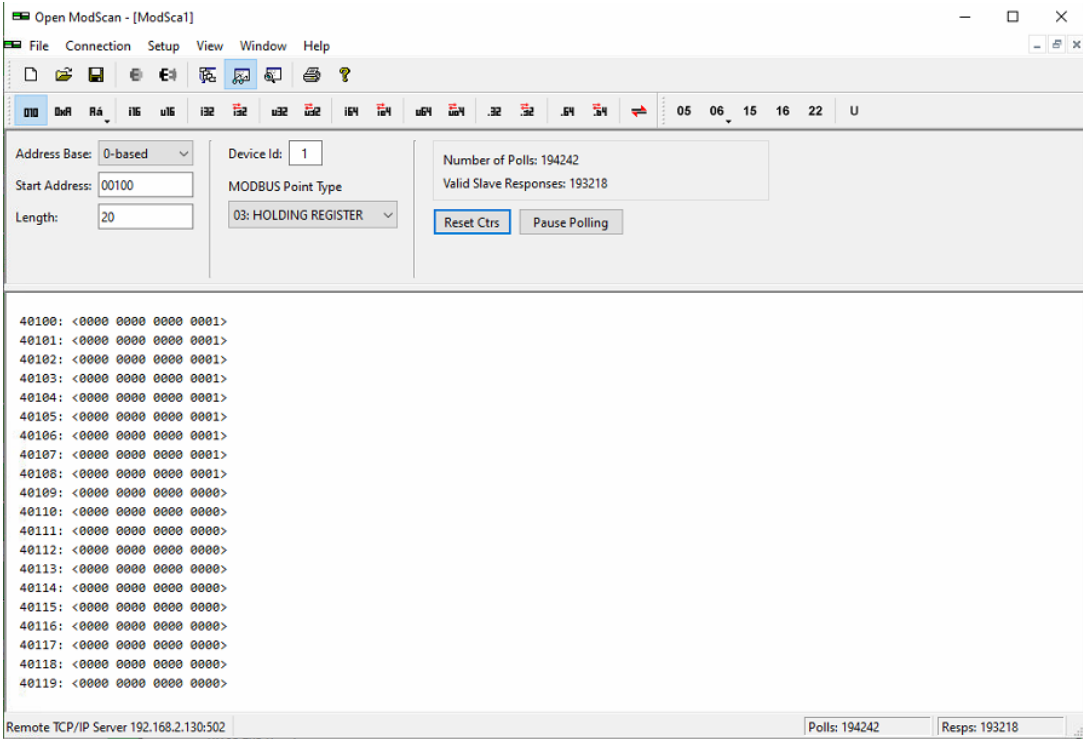


Imagen 3.39 - Visualización de estados de los bits de alarmas en ModScan

Posteriormente, se configura el Nodo Modbus Read para las lecturas de las alarmas. Se utiliza el cliente Modbus TCP “PLC MODICON”, especificando su dirección IP (192.168.2.130), el puerto estándar 502 y el Unit-ID del dispositivo. Esta configuración, indicada en la imagen 3.40, permite que Node-RED funcione como maestro Modbus, permitiendo la comunicación para leer los registros utilizados en la gestión de alarmas.

Edit Modbus-Read node > Edit modbus-client node

Delete

Cancel

Update

⚙ Properties

⚙

📄

Settings

Queues

Optionals

Name

PLC MODICON

Type

TCP

▼

Host

192.168.2.130

Port

502

TCP Type

DEFAULT

▼

Unit-Id

1

Timeout (ms)

1000

🔌 Reconnect on timeout

☒

Reconnect timeout (ms)

2000

Imagen 3.40 - Nodo Modbus

El nodo se configura para ejecutar lecturas cada 1 segundo, entregando los datos en un único buffer que posteriormente es decodificado para extraer cada dato binario. Se define la función FC3: Read Holding Registers, la cual permite consultar registros de 16 bits almacenados en la memoria del PLC. El parámetro Unit-ID se establece en 1, correspondiente al PLC utilizado en el proyecto. La dirección inicial configurada es 100, que coincide con el primer registro donde se almacenan los bits asociados al estado de las alarmas.

Adicionalmente, se establece una cantidad de registros acorde con el direccionamiento utilizado en la memoria del PLC, permitiendo leer en un solo ciclo un bloque completo de palabras vinculadas a las distintas alarmas del sistema. Esta configuración optimiza el flujo de datos y facilita el procesamiento posterior en Node-RED.

A continuación, se presenta la imagen 3.41 correspondiente a la configuración del nodo Modbus.

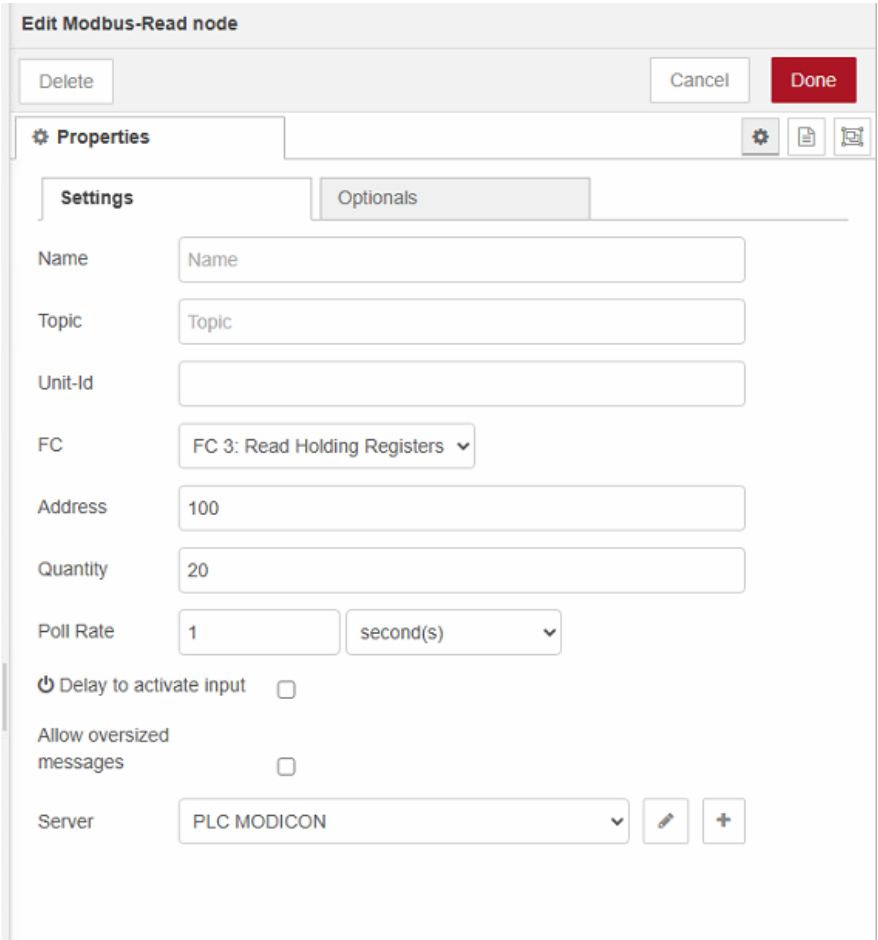


Imagen 3.41 - Config. Nodo Modbus

Después de leer los registros Modbus del PLC mediante la función FC3, es necesario descomponer la trama de datos recibida para extraer cada valor correspondiente al estado de las alarmas. Para llevar a cabo esta interpretación, se utiliza el nodo buffer-parser, el cual permite analizar el contenido binario del mensaje *msg.payload* y separar los datos en variables individuales según la estructura definida para el sistema. En esta sección se incorpora la imagen 3.42 que muestra la configuración aplicada en el nodo, con el propósito de complementar visualmente la descripción.

En la parametrización del nodo, el buffer-parser opera directamente sobre *msg.payload* utilizando la especificación estándar de Node-RED (*UI Specification*). Se definen múltiples elementos de salida tipo int16 (be), cada uno con una longitud de una palabra y un *offset* incremental de 2 bytes (0, 2, 4, 6, etc.), alineado con el direccionamiento configurado en la memoria interna del PLC.

El nodo genera como salida un objeto compuesto por pares clave/valor, donde cada elemento corresponde a uno de los registros consultados (por ejemplo: *item1*, *item2*, *item3*, etc.). Esta estructura permite identificar de manera independiente cada estado de alarma proveniente del PLC y simplifica su procesamiento en las etapas posteriores del flujo de gestión de alarmas.

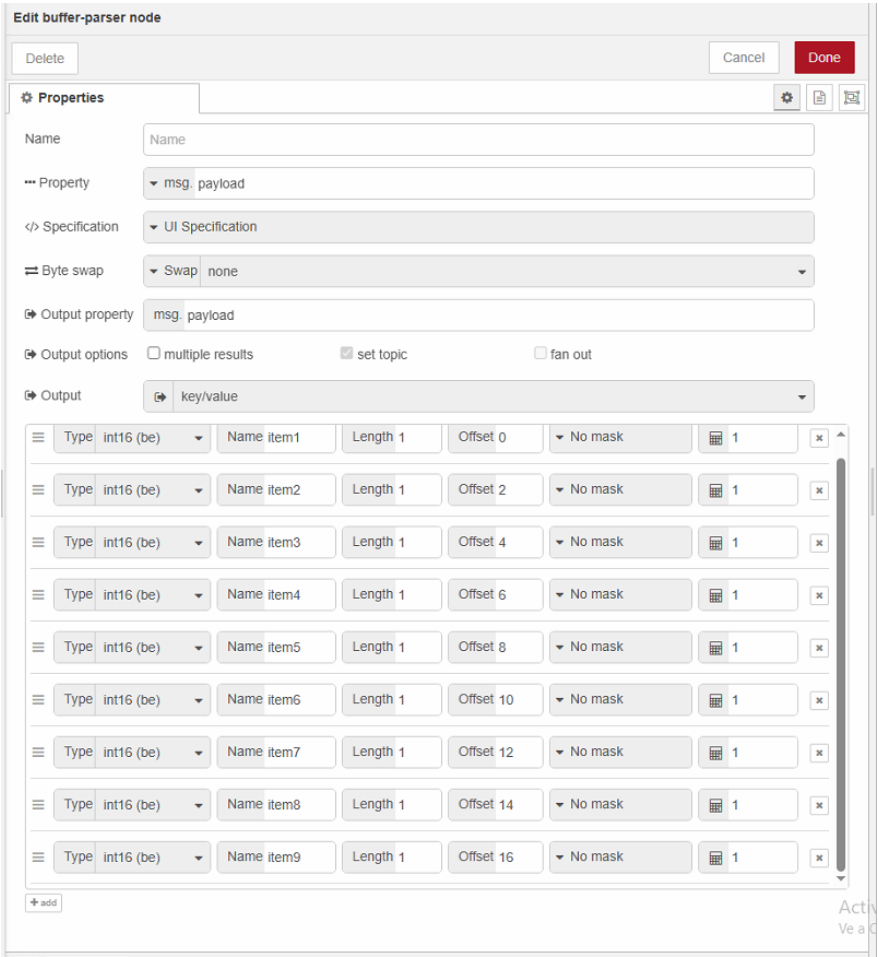


Imagen 3.42 - Nodo Buffer Parser

Para cada una de las alarmas provenientes del PLC, se implementa un nodo Function encargado de procesar el valor leído desde el buffer-parser y tratamiento de la data que posteriormente es almacenada en la base de datos. En este bloque se lee el valor de cada alarma. En la imagen 3.43 se visualiza el estado de la alarma de voltaje mediante la instrucción `parseInt(msg.values[0])`, asegurando que el dato sea interpretado correctamente. Adicionalmente, en el nodo se define un texto descriptivo asociado a la alarma (Alarma: Voltaje Alto), el cual se asigna a la propiedad `msg.alarmtext`. Este texto identifica el evento en las etapas posteriores de almacenamiento y visualización.

Finalmente, tanto el valor como el texto descriptivo se incorporan al mensaje mediante las propiedades `msg.value` y `msg.payload`, de manera que estén disponibles para los nodos siguientes del flujo.

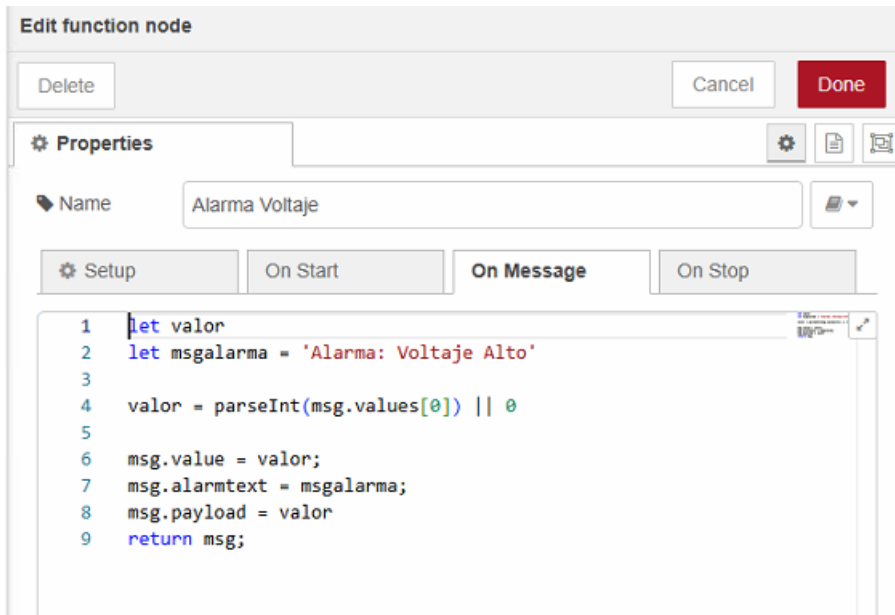


Imagen 3.43 - Nodo Function

3.4.1.5. Registro de alarmas en la base de datos mediante nodo Function en Node-RED

En este nodo Function se realiza un código, señalado en las imágenes 3.44 y 3.45, encargado de gestionar el registro de alarmas y organizar la información requerida para el almacenamiento en la base de datos. En primer lugar, el código recupera *flow.get* los valores actuales de las variables eléctricas medidas por el analizador (voltaje, frecuencia, corriente, factor de potencia, potencias activa, reactiva y aparente, así como los porcentajes de distorsión armónica). Simultáneamente, se obtiene el estado de la alarma y el texto asociado, enviados desde el nodo de tratamiento individual de alarmas. Para complementar esta descripción, en esta sección se incorpora la imagen 3.44 que muestra la configuración del nodo y el contexto de las variables utilizadas.

Posteriormente, el algoritmo verifica si la alarma ya se encuentra registrada mediante una variable booleana de control almacenada en la memoria de flujo (*flow.get("alarm01Sent")*) para el caso de la alarma mostrada en la figura, correspondiente al voltaje. Esta programación evita generar múltiples inserciones en la base de datos mientras la condición de alarma permanece activa. Cuando se detecta la transición desde un estado normal hacia un estado de alarma (valor igual a 1 y sin registro previo), el código marca internamente la alarma como reportada y construye una instrucción SQL del tipo *INSERT INTO*, la cual inserta la fecha y hora del evento, el texto de la alarma y los valores eléctricos al momento de la activación.

Luego de generarse la consulta SQL, esta se asigna a *msg.payload* y *msg.query*, permitiendo su ejecución por el nodo siguiente del flujo (MSSQL-PLUS). Finalmente, cuando la alarma retorna a un estado normal (valor igual a 0), el código restablece la

variable de control *alarm01Sent*, dejando disponible la captura de futuros eventos asociados a la misma condición.

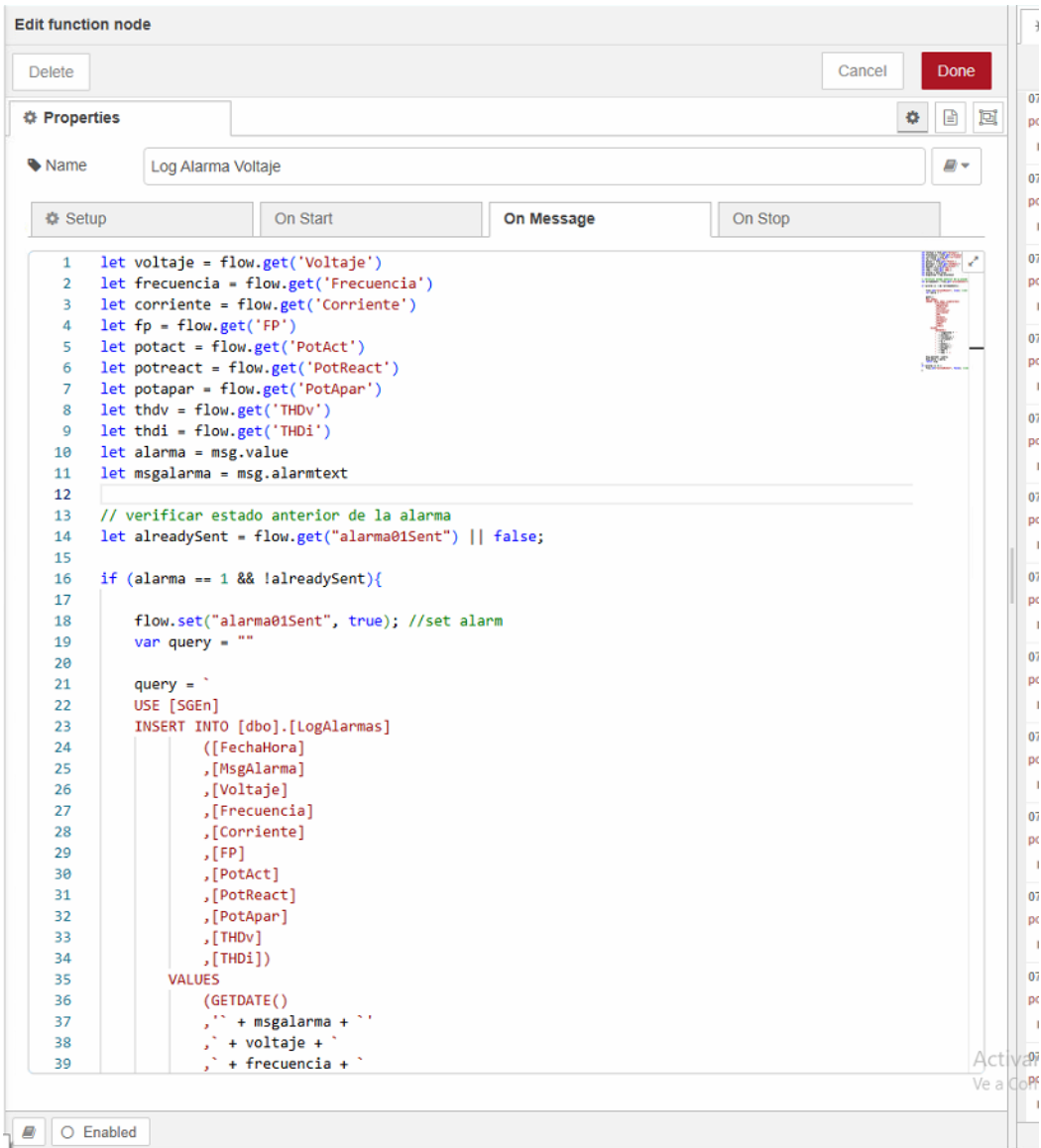


Imagen 3.44 - Código Alarmas I

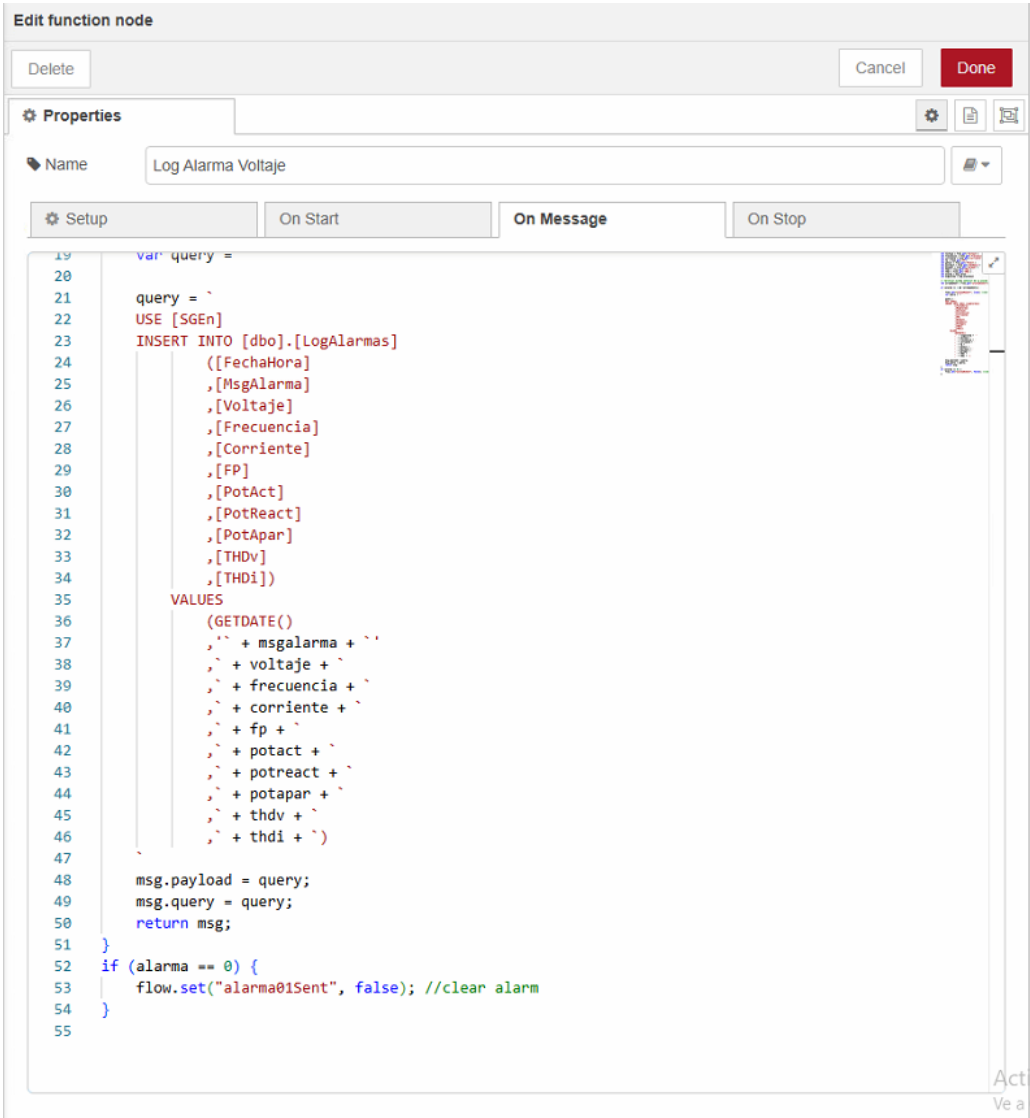


Imagen 3.45 - Código Alarmas II

3.4.1.6. Configuración de la conexión MSSQL en Node-RED para la consulta de Alarmas

Para permitir el registro de alarmas en la base de datos SQL Server, se implementa el nodo MSSQL-PLUS, el cual se duplica desde el flujo de registros de los parámetros de la tabla *Log.SGEn*, utilizando la misma conexión. Este nodo se divide en dos componentes: el nodo MSSQL-CN, encargado de establecer la conexión con el servidor SQL, y el nodo MSSQL, responsable de ejecutar las consultas generadas previamente en los nodos Function.

3.4.1.7. Diagrama de flujo para la lectura, procesamiento y registro de alarmas en Node-RED

En la imagen 3.47 se visualiza el flujo implementado en Node-RED para la lectura de estados de alarmas desde el PLC Modicon M221 mediante Modbus TCP, su decodificación en el nodo buffer parser, su posterior procesamiento individual de cada alarma en nodos Function y la inserción de los eventos en la base de datos SQL Server mediante el nodo MSSQL-PLUS.

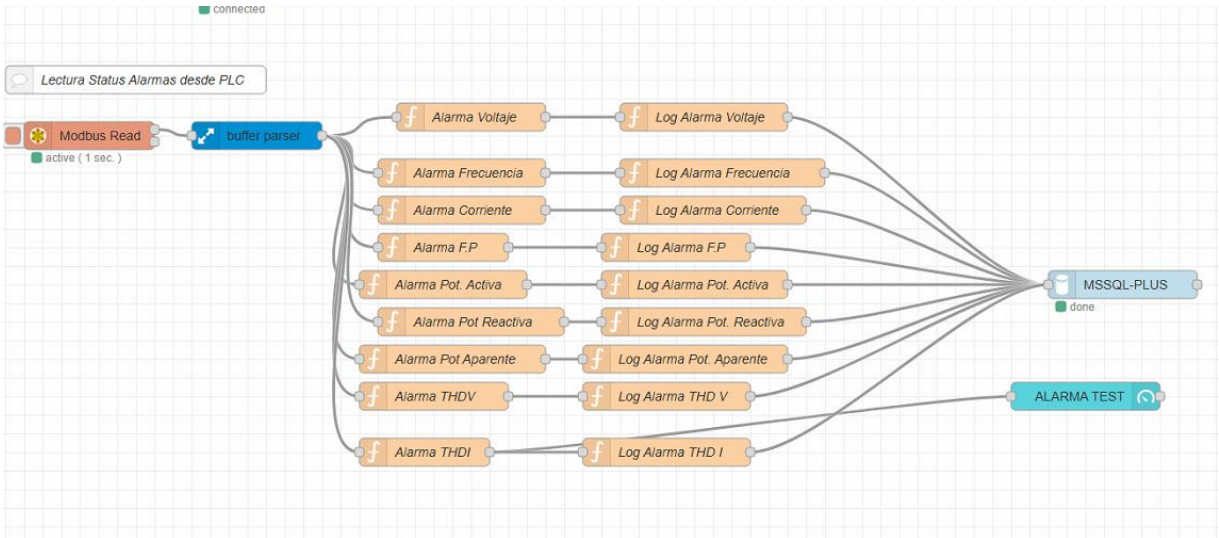


Imagen 3.46 - Flujo Node Red - SQL

3.4.1.10 Validación del registro de alarmas en la base de datos SQL Server

Después de configurar la lógica de alarmas en Node-RED, se realiza la verificación del registro de eventos dentro de la base de datos SGen utilizando SQL Server Management Studio. Para ello, se consulta la tabla *LogAlarmas*, donde se registran todos los eventos generados.

La consulta ejecutada mediante una función *SELECT* permite visualizar los registros, confirmando que cada alarma se encuentra correctamente almacenada con su respectiva fecha y hora, el texto y los valores de cada parámetro. Entre las variables registradas se incluyen: voltaje, frecuencia, corriente, factor de potencia, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y distorsión armónica (THD-V y THD-I). Además, la integración de un identificador incremental *RowID* facilita la trazabilidad de los eventos.

Los resultados obtenidos en la tabla demuestran que el proceso de registro desde Node-RED se ejecuta correctamente y sin redundancia por evento. Esto valida que la comunicación con SQL Server se encuentra correctamente configurada y que el sistema es capaz de registrar de forma automática cada alarma detectada por el PLC Modicon M221, tal como se indica en la imagen 3.48.

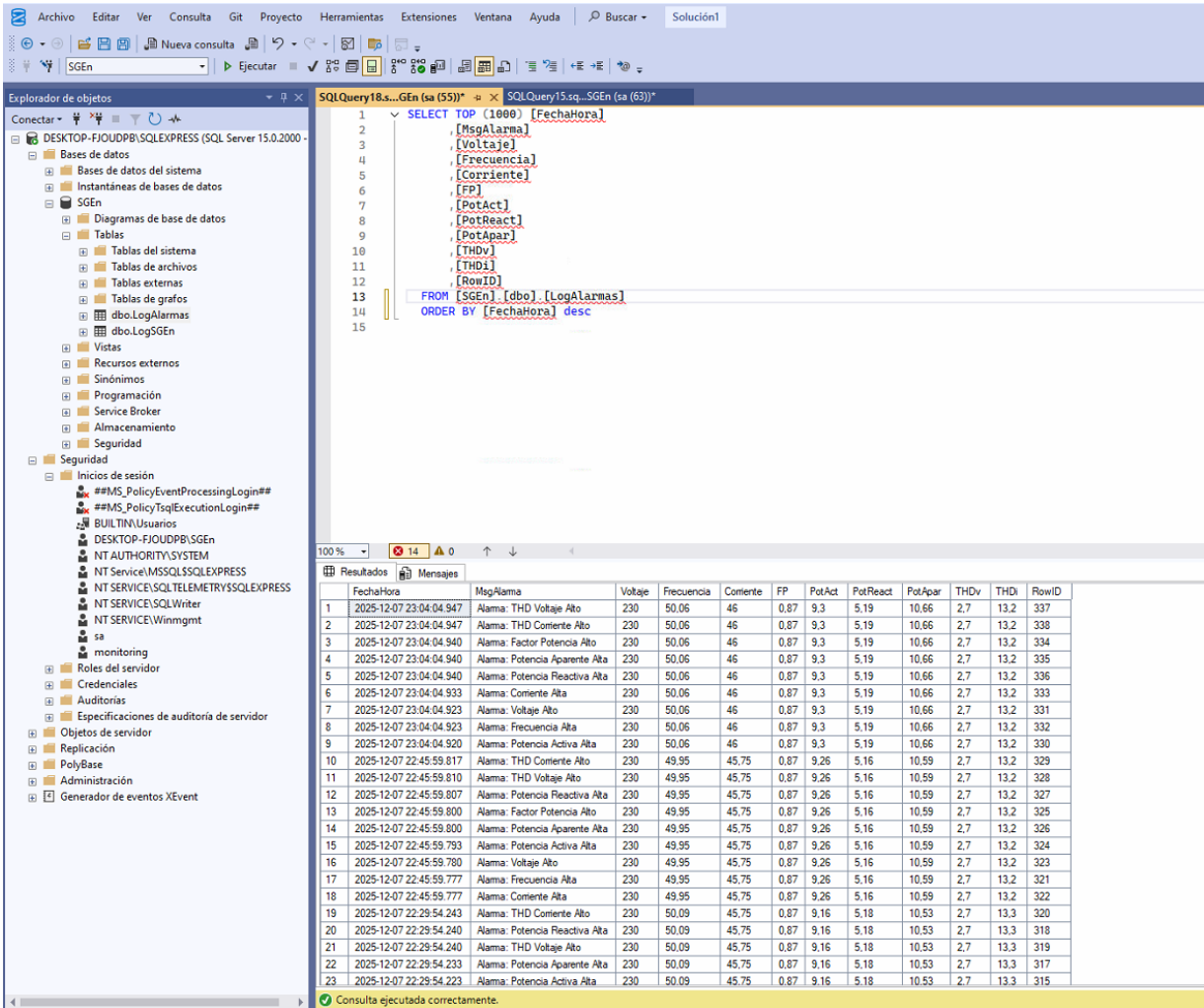


Imagen 3.47 - Log Alarmas SQL

3.4.1.8. Servicio de mensajería SMTP para alarmas

El Proyecto SGEN dispone de un módulo de envío automático de alarmas, implementado en Node-RED mediante un servicio de mensajería basado en el protocolo estándar de internet para envío de correos electrónicos (SMTP). Esta notificación se habilita cuando se detectan condiciones anómalas en los parámetros adquiridos. Específicamente, valores fuera de rango en: voltaje, factor de potencia, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, corriente, THDv y THDi.

3.4.1.9. Configuración de Nodo Function para mensajería de alarmas

Este nodo contiene la lógica encargada de evaluar si corresponde enviar correo electrónico mediante protocolo SMTP configurado en Node-RED. El proceso de evaluación utiliza los rangos y condiciones definidos en la sección 3.4.1.3, donde se especifica la lógica de alarmas implementada en el PLC Modicon M221.

Para generalizar, se describe la configuración del nodo Function para mensajería de alarmas vía correo electrónico usando el parámetro Voltaje, sin embargo, cabe destacar que esta configuración se realiza para cada parámetro de energía eléctrica adquirido en el

sistema. El nodo recibe el bit del estado de la alarma *msg.value* y recupera desde el flujo del sistema el valor actual de voltaje previamente almacenado *flow.get('Voltaje')*.

Luego, el script realiza una serie de verificaciones:

- Validación de datos: si el voltaje no es un valor numérico válido, el proceso se detiene sin generar notificaciones.
- Confirmación de estado de alarma: si el bit proveniente del PLC indica que no existe alarma activa, se reinicia el flag interno *Flow.set(emailSentVoltaje)* que permite reenviar correos en futuros eventos.
- Detección de condición fuera de rango: se evalúa si el voltaje está por encima del rango máximo (≥ 242 V) o por debajo del mínimo (≤ 198 V). Si el valor se encuentra dentro del rango permitido, no se envía ninguna alerta.
- Control de envío único por evento: se utiliza una variable almacenada en el flujo *alreadySent = flow.get("emailSentVoltaje")* para garantizar que solo se emita un correo por cada evento, evitando así envíos repetitivos mientras persiste la misma condición anómala.
- Generación del mensaje de alerta: cuando se detecta una desviación fuera de rango y la alarma está activa, el nodo compone el asunto y el contenido del correo electrónico. El cuerpo del mensaje incluye: descripción de la alarma, voltaje detectado, tipo de condición (alto o bajo, solo para el caso de Voltaje y Corriente), fecha y hora del evento.

Finalmente, el nodo envía el mensaje estructurado para el nodo Send Email, permitiendo notificar al usuario mediante correo electrónico. A continuación, se puede ver la representación en la imagen 3.49 y 3.50, de la lógica implementada.

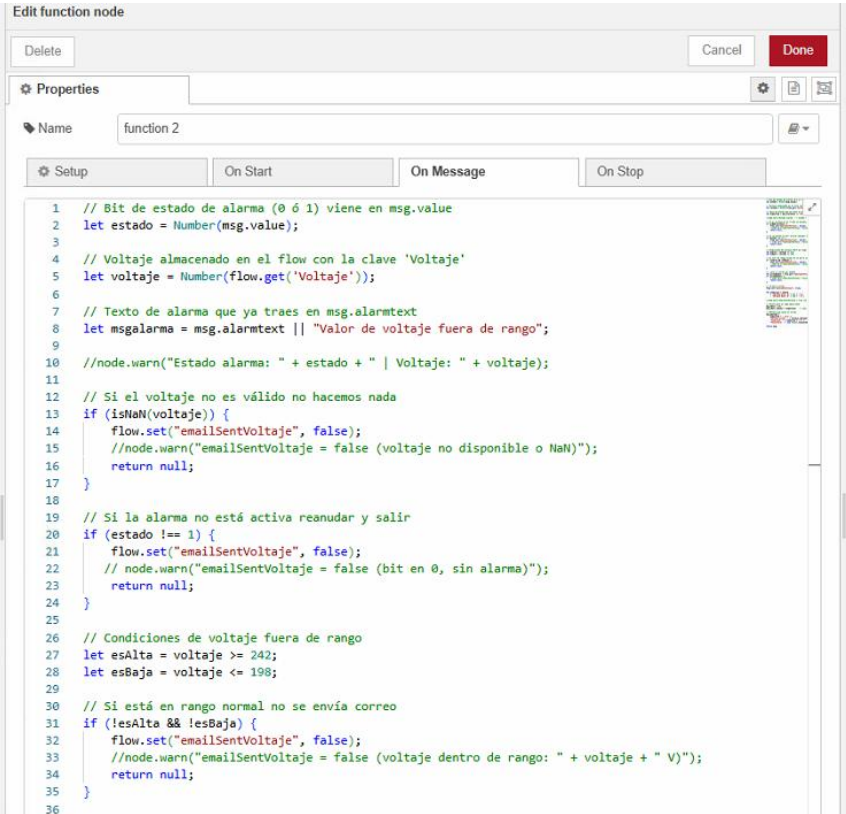


Imagen 3.48 - Function Mensajería Alarmas I

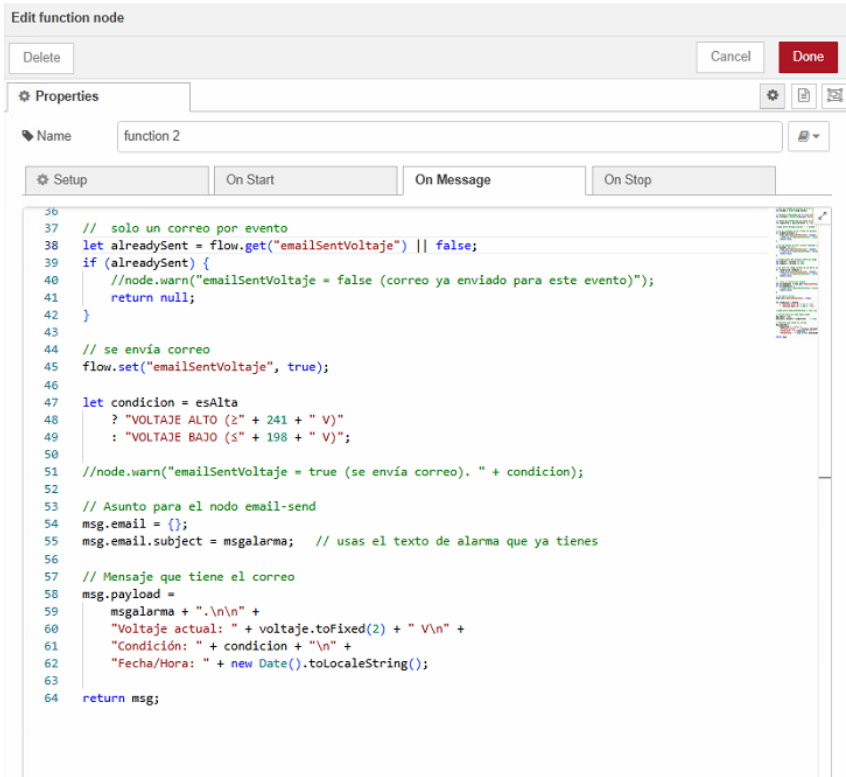


Imagen 3.49 - Function Mensajería Alarmas II

3.4.1.10. Configuración de Nodo Send Email para mensajería de alarmas

Para habilitar el envío automático de correos electrónicos ante condiciones de alarma, se configura en Node-RED un nodo de transporte SMTP, indicado en la imagen 3.51, bajo el nombre “Notificación SGen”. Este nodo se configura para operar mediante el servidor de correo de Gmail, utilizando un canal seguro. En la pestaña del nodo de transporte se configuran los siguientes parámetros:

- Servidor SMTP (host): smtp.gmail.com
- Puerto: 465, correspondiente a una conexión segura mediante SSL.
- Secure: opción habilitada para cifrado en la comunicación.
- Método de autenticación: login.
- Usuario: notificacionesgen@gmail.com
- Contraseña: contraseña de aplicación (App Password) generada en la cuenta de Gmail para permitir el uso de SMTP.

Edit email-send node > Edit email-transport node

Delete Cancel Update

Properties

name: Notificacion SGen

host: smtp.gmail.com

port: 465

secure: ☒

auth: login

user: notificacionesgen@gmail.com

password:

proxy:

Imagen 3.50 - Nodo de transporte SMTP

Posteriormente, en el Nodo Send Email (imagen 3.52) se definen los parámetros del mensaje:

- Transport: selección del transporte previamente configurado “Notificación SGen”.
- Remitente (from): notificacionesgen@gmail.com
- Destinatario principal (to): correo del usuario responsable de la supervisión del sistema.
- Destinatario en copia (cc): correo adicional para respaldo o supervisión compartida.
- Asunto del mensaje: variable dinámica msg.email.subject, generada en el nodo Function según la alarma detectada.
- Contenido del correo (payload): enviado en formato de texto, construido con la información de voltaje, condición y fecha/hora del evento.

Prioridad: configurada como high para asegurar relevancia en el buzón del receptor.

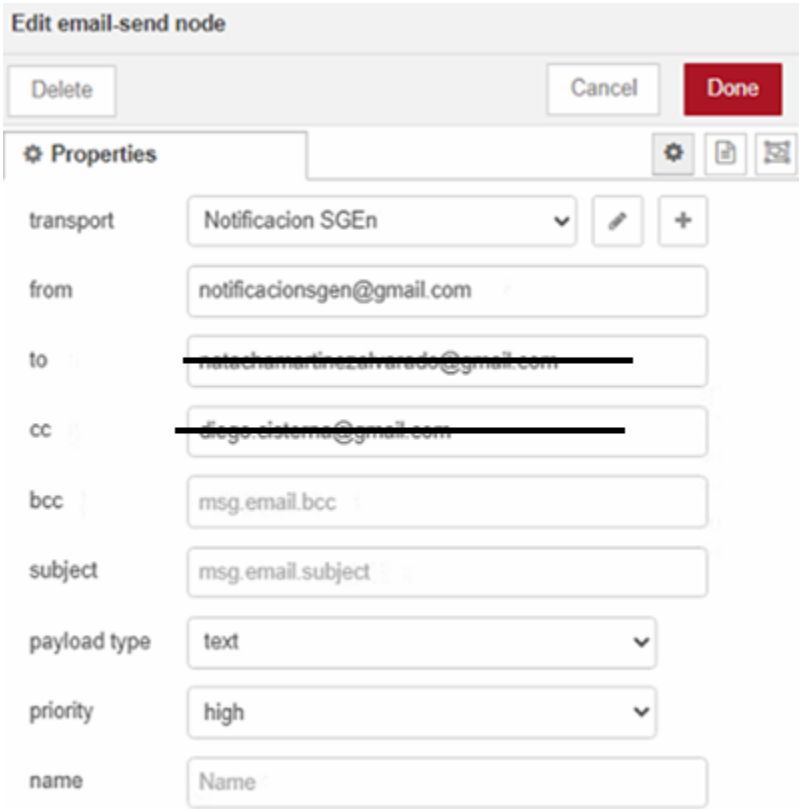


Imagen 3.51 - Nodo de transporte SMTP II

Con esta configuración, el SGEN puede generar alarmas en tiempo real mediante el protocolo SMTP, garantizando la notificación oportuna ante cualquier desviación en los parámetros eléctricos monitoreados.

3.4.1.11. Visualización general del flujo para mensajería de alarmas

El flujo de generación de mensajería por correo inicia con la lectura del estado de alarmas que contiene el nodo Function encargado del procesamiento del valor leído desde el buffer-parsed, tras lo cual un nodo Function evalúa las condiciones para determinar si corresponde generar el envío de un correo de alerta. Cuando se identifica un valor fuera de los rangos establecidos, el sistema construye el mensaje de notificación, incorporando la descripción del evento, el valor detectado y la marca temporal asociada. Posteriormente, el nodo Send Email transmite el mensaje utilizando el servidor smtp.gmail.com a través de un canal seguro TLS. Esta implementación permite garantizar una notificación en tiempo real a usuario(s), asegurando una respuesta oportuna ante fallas eléctricas o parámetros operativos que exceden los límites prescritos por la normativa aplicable. La imagen 3.53 representa el flujo correspondiente a envío de mensajería vía SMTP del sistema:

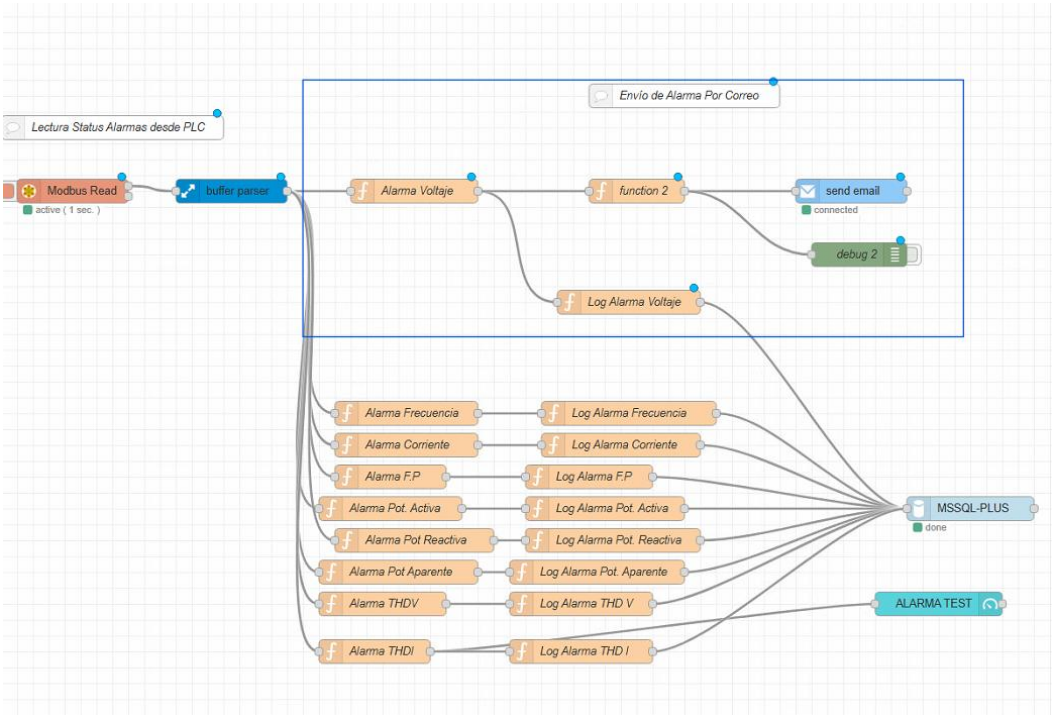


Imagen 3.52 – Flujo SMTP Node Red

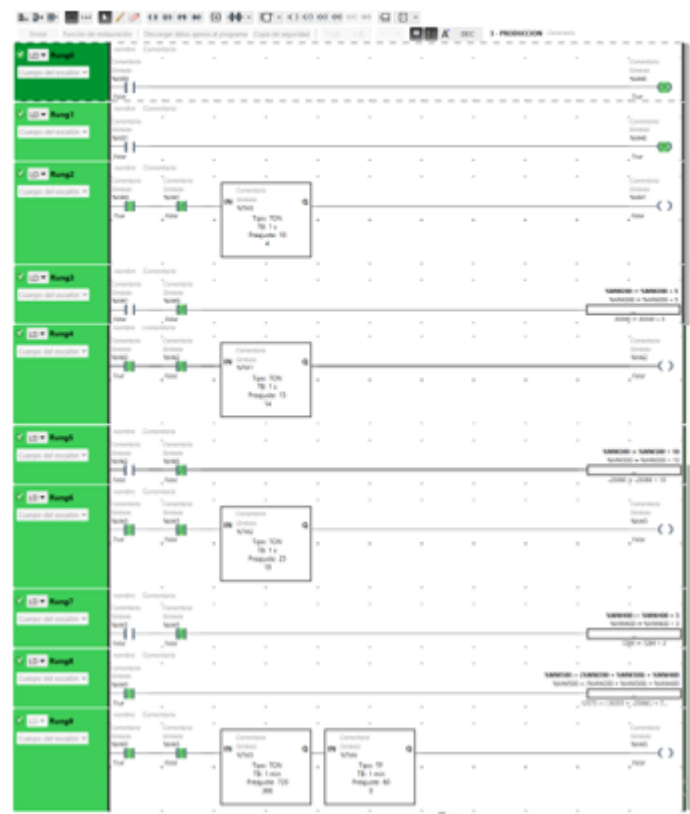
3.4.2. Simulación Productiva y Cálculo del EnPI

En esta sección se aborda el flujo completo utilizado para generar y procesar las variables necesarias para el cálculo del Indicador de Desempeño Energético (EnPI). El PLC implementa una simulación de toneladas acumuladas, permitiendo disponer de una referencia productiva sin depender de datos reales. Node-RED recibe esta variable mediante Modbus y la procesa junto con la energía acumulada en kWh, ordenando ambos valores por períodos mensuales.

Con estas dos magnitudes, producción y energía, Node-RED obtiene el EnPI, definido como kWh/Ton, permitiendo evaluar el desempeño energético del sistema. A continuación, se describen la simulación implementada en el PLC, el tratamiento de datos en Node-RED y el método utilizado para organizar y calcular estos indicadores.

3.4.2.1. Lógica de simulación de producción en el PLC

La simulación de la producción se implementa directamente en el PLC Modicon M221, cuyo objetivo es generar una variable de toneladas acumuladas con un comportamiento no lineal. De esta forma, la producción simulada no avanza con un incremento constante, sino que presenta variaciones en el ritmo de crecimiento, más cercanas a la dinámica real de una planta. En la imagen 3.54 se muestra el detalle de la programación utilizada.



3.4.2.2. Procesamiento de la Producción en Node-RED

La producción simulada en el PLC se adquiere en Node-RED mediante un nodo Modbus-Read, configurado para leer el registro donde el PLC almacena las toneladas acumuladas. En este nodo se selecciona la función FC3: Read Holding Registers, se define la dirección inicial 500, una cantidad de lectura igual a 1 y un período de sondeo de 1 minuto. La imagen 3.55 muestra la configuración completa del nodo Modbus-Read empleada para obtener el dato de producción simulado desde el PLC.

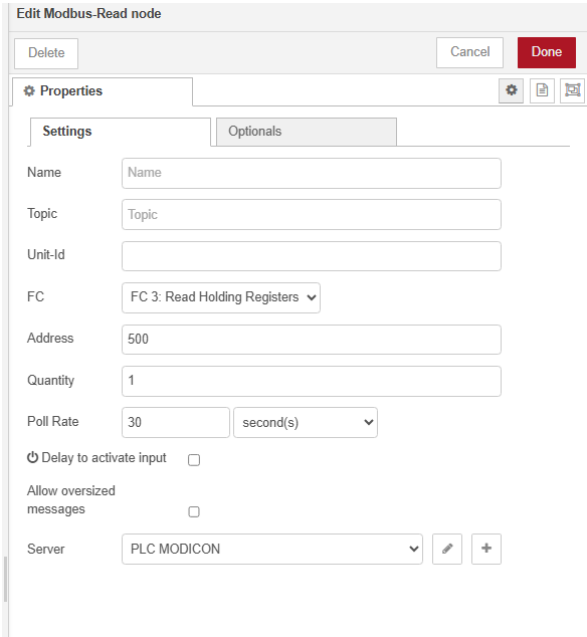


Imagen 3.54 - Nodo Modbus Read

El valor leído llega a Node-RED en *msg.payload* como un arreglo con un único elemento ([valor]) y es procesado por el nodo Function denominado “Prod_calc”. En este bloque se convierte el dato a número y se recuperan desde la memoria de flujo *flow.get* el último total registrado, la estampa del mes anterior y el acumulado mensual de producción.

El algoritmo calcula la producción del intervalo mediante la diferencia entre el total actual y el total previo. Si el totalizador disminuye, producto de un reinicio o pérdida momentánea de valores en el PLC, el cálculo evita obtener valores negativos, asignando un incremento igual a cero. Posteriormente, el código identifica el mes actual a partir de la fecha del sistema y genera una clave de periodo en formato AAAA-MM. Si existe un cambio de mes respecto a la última lectura almacenada, el acumulado mensual se reinicia de forma automática; si no, se suma el valor del intervalo a la producción mensual *prod_mes_ton*.

El nodo Function construye finalmente un objeto estructurado que incluye la marca de tiempo *timestamp*, el mes *mes*, el total de toneladas acumuladas *total_ton*, la producción del intervalo *prod_interval_ton* y el acumulado mensual *prod_mes_ton*. Este objeto se asigna a *msg.payload* y se envía al flujo siguiente, además de almacenarse como snapshot (*flow.set('snapshot_prod', ...)*) para permitir el cruce posterior con los datos de energía. La Imagen 3.56 correspondiente al nodo Function muestra el código completo utilizado en esta etapa y la Imagen 3.57 muestra una vista general de los nodos utilizados.

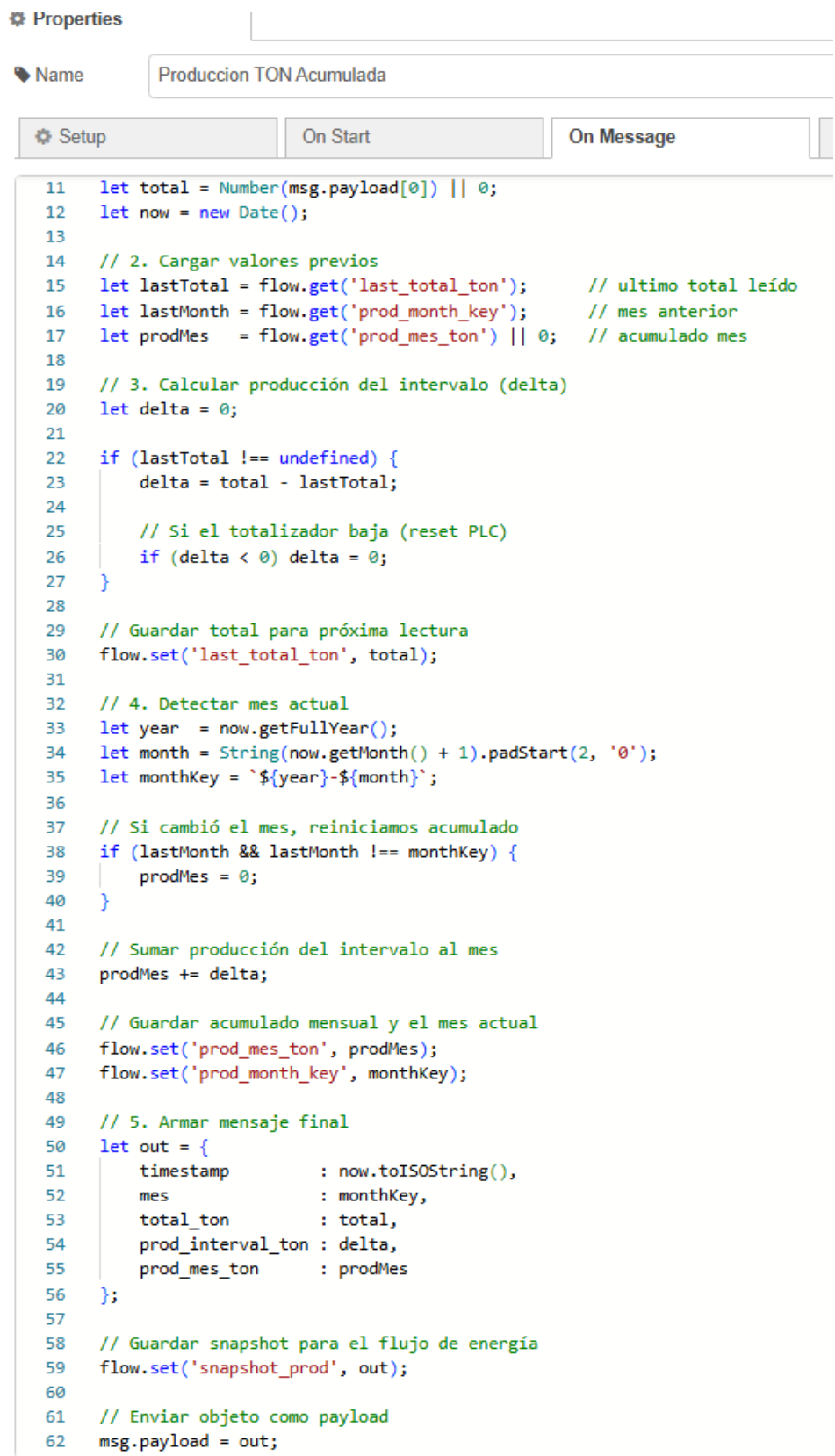


Imagen 3.55 - Código Function Producción Node Red

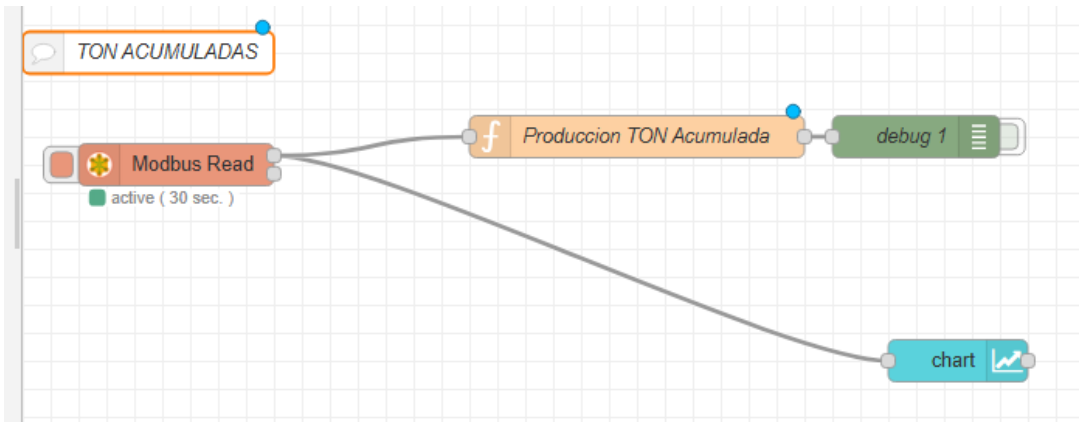


Imagen 3.56 - Flujo Producción Acumulada Node Red

3.4.2.3. Procesamiento de la Energía Acumulada (kWh) en Node-RED y Cálculo del EnPI

La energía eléctrica medida por el analizador Phoenix Contact se integra en Node-RED mediante un nodo Modbus-Read, encargado de consultar periódicamente el totalizador de energía acumulada. En este nodo se emplea la función FC3: Read Holding Registers, configurada para leer diez registros consecutivos a partir de la dirección 33024, correspondiente al bloque donde el medidor almacena los valores de energía. La imagen 3.58 muestra la configuración utilizada, donde se establece un período de sondeo de 30 segundos y el servidor Modbus identificado como *Analizador de Red*.

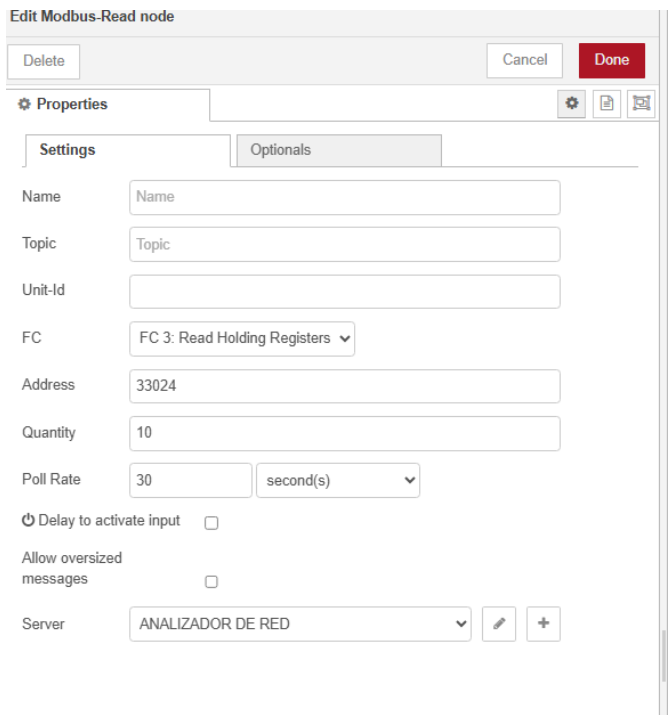


Imagen 3.57 - Modbus Read

Los datos recibidos se presentan en un *buffer* binario y son procesados por un nodo buffer-parser. En este bloque se define la interpretación de los registros como variables de tipo *float (big endian)*, sin aplicación de *byte swap*, en coherencia con el formato utilizado por el medidor. El nodo genera un objeto con pares clave/valor que permite extraer el totalizador de energía en formato numérico para su tratamiento posterior.

El primer procesamiento de esta lectura se realiza en el nodo Function denominado “Ener_acumulada”. En este bloque la energía leída es normalizada desde Wh hacia kWh mediante una división por 1000, y el valor resultante se almacena tanto en *msg.payload* como en la memoria de flujo (*flow.set('kwhac', ...)*), quedando disponible para los cálculos siguientes.

El nodo Function “Ener_backend”, que se visualiza en la imagen 3.59 y 3.60, ejecuta el procesamiento principal de la variable energética. En primer lugar, recupera el totalizador de energía ya normalizado y carga desde la memoria de flujo los valores previos: última lectura *last_total_kwh*, última clave de mes *ener_month_key* y el acumulado mensual *ener_mes_kwh*. A partir de estos datos calcula la energía del intervalo como la diferencia entre la lectura actual y la anterior. En caso de que el totalizador disminuya debido a un reinicio del medidor, el algoritmo corrige el valor para evitar intervalos negativos.

El bloque genera además el acumulado mensual de energía, detectando automáticamente los cambios de mes mediante el formato AAAA-MM. Cuando se identifica un nuevo periodo, el acumulado mensual se reinicia y el valor del intervalo comienza a contabilizarse para el nuevo mes.

Una vez procesada la energía, el nodo recupera el *snapshot* de producción generado previamente por el Function “Prod_calc”, lo que permite al sistema contar con los valores de producción por intervalo y acumulada al mismo instante en que se recibe la energía. Con ambas magnitudes disponibles, energía y producción, el algoritmo calcula el EnPI del intervalo (kWh/ton) y el EnPI mensual, siempre que ambas variables sean mayores que cero.

Finalmente, el Function construye un arreglo estructurado que contiene la fecha y hora, el mes del registro, la energía total y por intervalo, la producción asociada, y el indicador EnPI resultante.

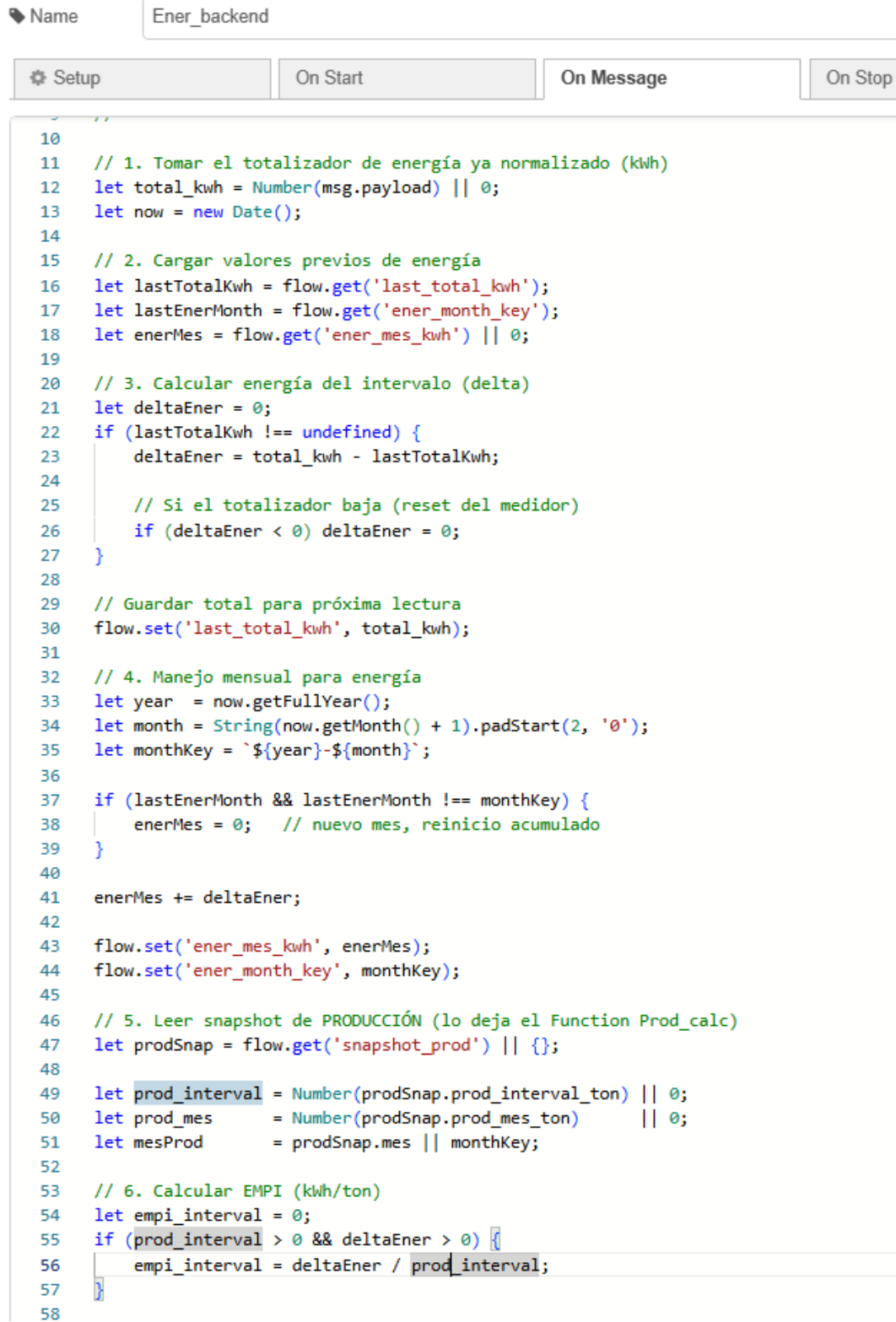


Imagen 3.58 - Código Nodo Function Indicador Energía I

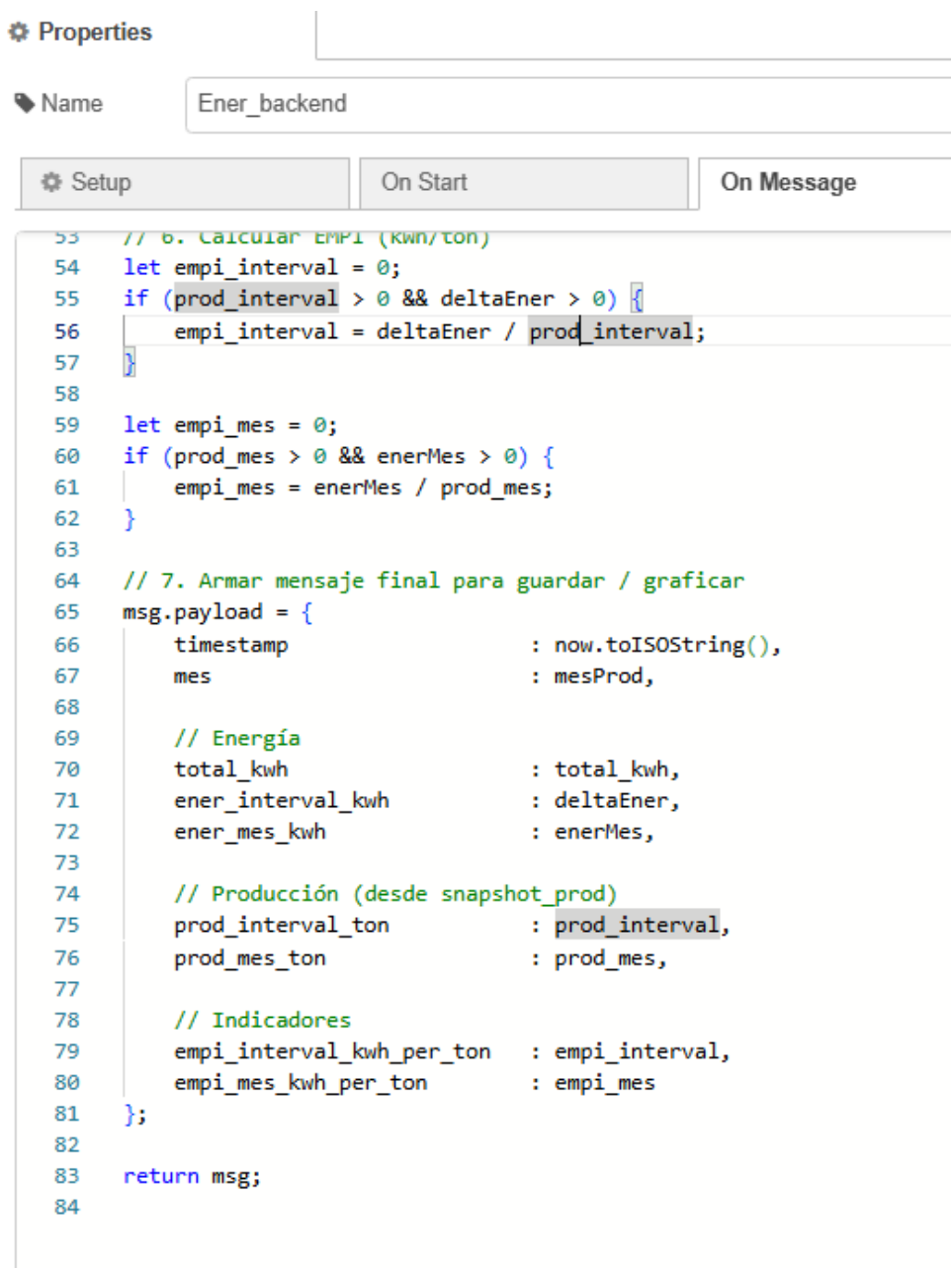


Imagen 3.59 - Código Nodo Function Indicador Energía II

Este arreglo es enviado al siguiente nodo del flujo para su almacenamiento en SQL, cuyo detalle se presenta en la imagen 3.61. La imagen 3.62 del nodo MSSQL-PLUS muestra la configuración empleada para ejecutar la sentencia *INSERT* generada por el Function Envío a SQL.

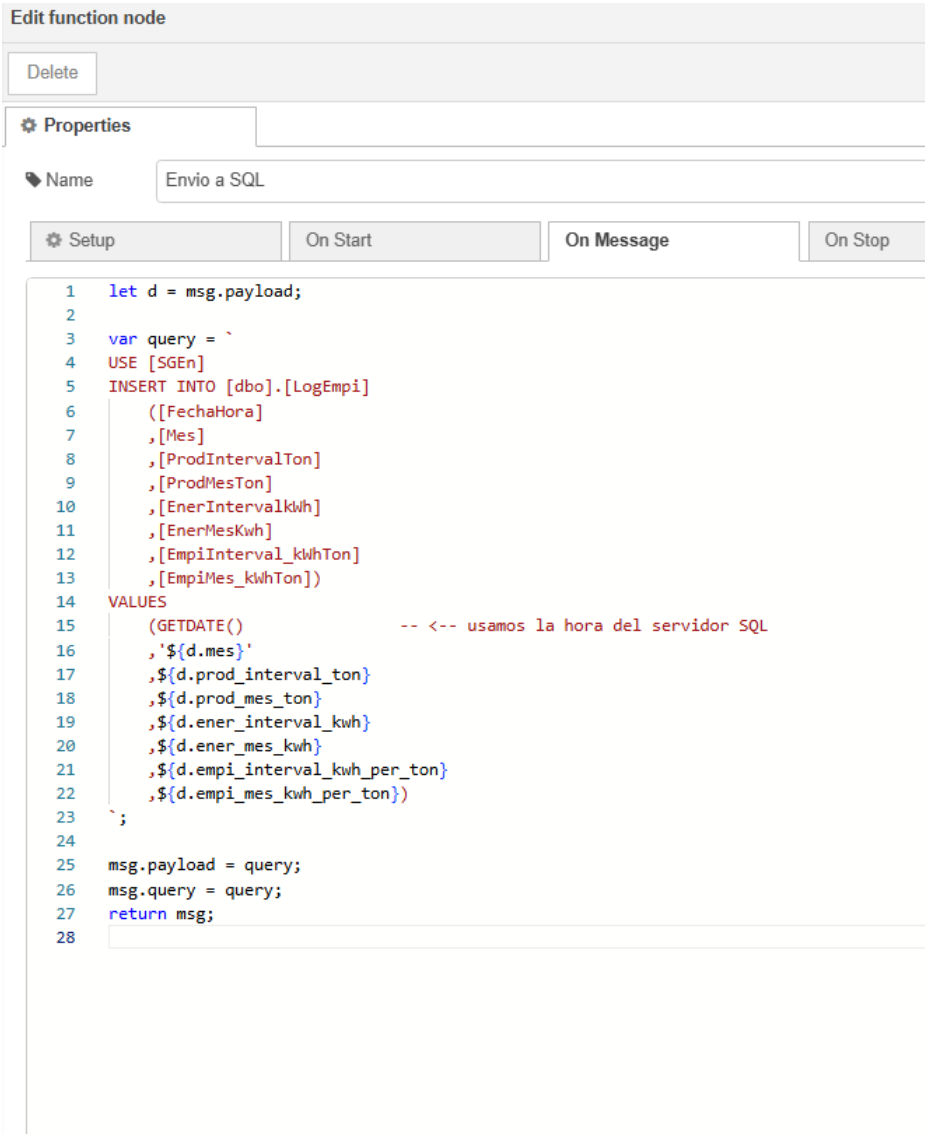


Imagen 3.60 – Código de Construcción de Consulta SQL en Node-Red

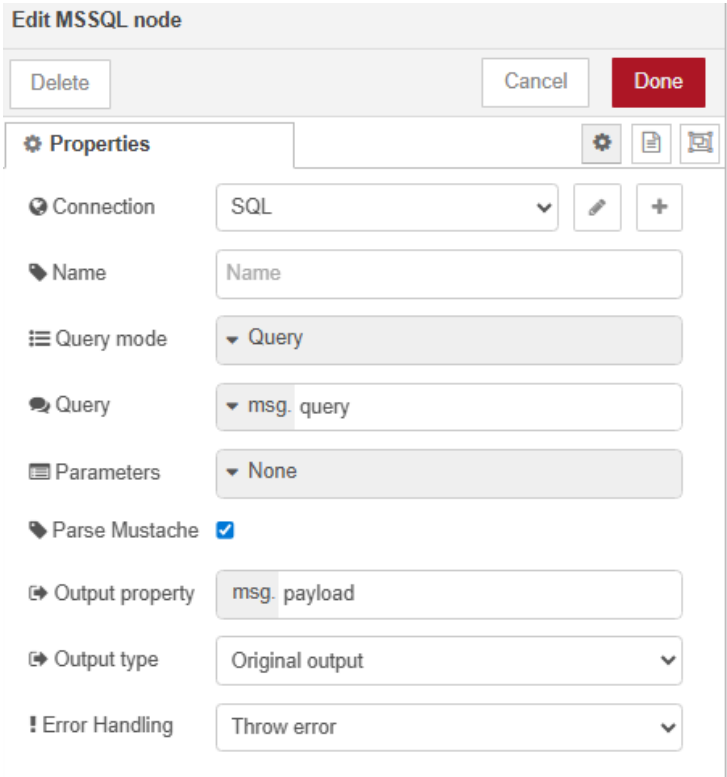


Imagen 3.61 - Configuración Nodo MSSQL

3.4.2.4. Validación de registros en SQL Server

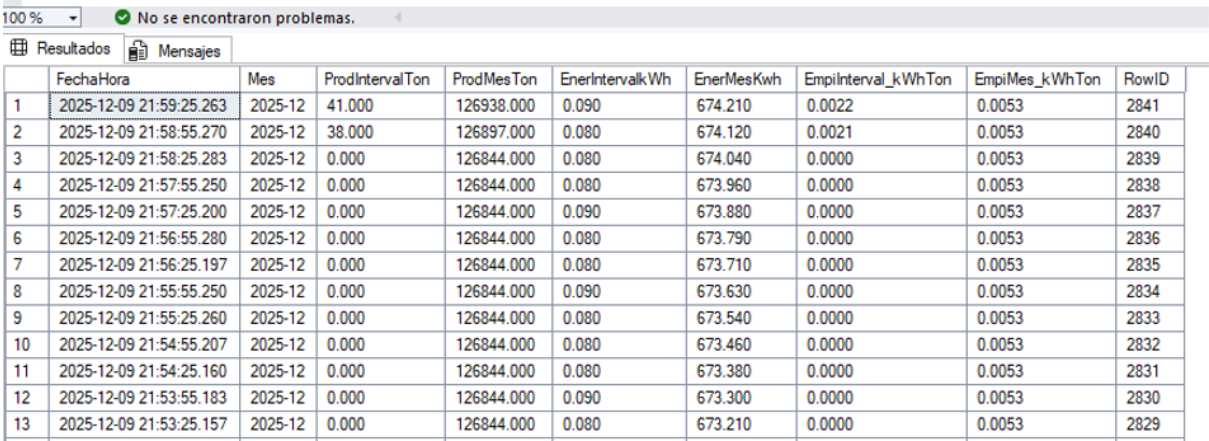
Para almacenar los datos procesados por Node-RED, en SQL Server se crea previamente la tabla *LogEnpi*, diseñada para registrar la producción del intervalo, producción mensual, energía consumida, energía acumulada por mes y el indicador de desempeño energético (EnPI). Esta estructura permite consolidar en una sola entidad toda la información relevante para el análisis energético del sistema.

Una vez realizada la inserción desde Node-RED, la validación se realiza mediante SQL Server Management Studio, consultando los registros más recientes de la tabla. Esto se ejecuta mediante la siguiente instrucción:

```
SELECT TOP (100) *
FROM [SGen].[dbo].[LogEmpi]
ORDER BY FechaHora DESC;
```

La imagen 3.63 muestra el resultado de esta consulta, donde se aprecia que la tabla almacena correctamente la marca de tiempo del evento, el mes asociado, la producción por intervalo y acumulada, la energía del intervalo y acumulada, y los valores del EnPI, tanto a nivel de intervalo como mensual. La coherencia de estos datos confirma que el flujo completo, desde la adquisición y procesamiento en Node-RED hasta el almacenamiento en SQL, funciona adecuadamente y registra la información en forma consistente.

La correcta disponibilidad de estos registros permite utilizar la base de datos como fuente para análisis posteriores, reportes energéticos y visualizaciones en plataformas como Grafana.



	FechaHora	Mes	ProdIntervalTon	ProdMesTon	EnerIntervalKWh	EnerMesKwh	EmpiInterval_kWhTon	EmpiMes_kWhTon	RowID
1	2025-12-09 21:59:25.263	2025-12	41.000	126938.000	0.090	674.210	0.0022	0.0053	2841
2	2025-12-09 21:58:55.270	2025-12	38.000	126897.000	0.080	674.120	0.0021	0.0053	2840
3	2025-12-09 21:58:25.283	2025-12	0.000	126844.000	0.080	674.040	0.0000	0.0053	2839
4	2025-12-09 21:57:55.250	2025-12	0.000	126844.000	0.080	673.960	0.0000	0.0053	2838
5	2025-12-09 21:57:25.200	2025-12	0.000	126844.000	0.090	673.880	0.0000	0.0053	2837
6	2025-12-09 21:56:55.280	2025-12	0.000	126844.000	0.080	673.790	0.0000	0.0053	2836
7	2025-12-09 21:56:25.197	2025-12	0.000	126844.000	0.080	673.710	0.0000	0.0053	2835
8	2025-12-09 21:55:55.250	2025-12	0.000	126844.000	0.090	673.630	0.0000	0.0053	2834
9	2025-12-09 21:55:25.260	2025-12	0.000	126844.000	0.080	673.540	0.0000	0.0053	2833
10	2025-12-09 21:54:55.207	2025-12	0.000	126844.000	0.080	673.460	0.0000	0.0053	2832
11	2025-12-09 21:54:25.160	2025-12	0.000	126844.000	0.080	673.380	0.0000	0.0053	2831
12	2025-12-09 21:53:55.183	2025-12	0.000	126844.000	0.090	673.300	0.0000	0.0053	2830
13	2025-12-09 21:53:25.157	2025-12	0.000	126844.000	0.080	673.210	0.0000	0.0053	2829

Imagen 3.62 – Tabla del Log SQL Variables Producción EnPi

CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL FRONTEND DEL SISTEMA

El frontend del Sistema de Gestión Energética (SGEn) corresponde a la capa visual donde se presentan, organizan e interpretan los datos provenientes del backend. Su objetivo es entregar una representación clara, en tiempo real y orientada a indicadores clave, de las variables eléctricas medidas por el analizador, la producción simulada, la energía consumida y el indicador de desempeño energético (EnPI).

En este capítulo se describe la construcción del dashboard principal utilizando Grafana, abordando desde la conexión con la base de datos SQL hasta el diseño de los paneles y gráficos que conforman la interfaz final del sistema.

4.1. Conexión de Grafana con la base de datos SQL Server

Para habilitar la capa de visualización del Sistema de Gestión Energética, se configura en Grafana una conexión directa hacia la base de datos SQL donde se almacenan los registros de producción, energía y los indicadores energéticos. Para ello, desde el menú Connections → Data Sources, se instala y habilita el complemento oficial Microsoft SQL Server (MSSQL), que permite a Grafana ejecutar consultas sobre la base de datos SGEn. Una vez instalado el complemento, se define la configuración del origen de datos especificando la dirección IP del servidor SQL (192.168.2.200) y el puerto de comunicación, junto con el nombre de la base de datos y los parámetros de conexión. La imagen 4.1 muestra esta configuración aplicada en el proyecto.

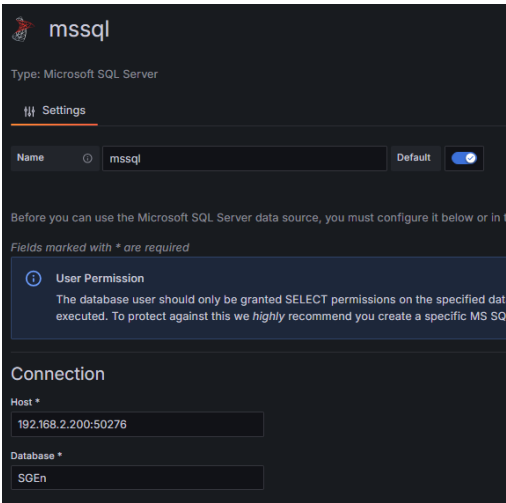


Imagen 4.1 - Config MSSQL en Grafana

Grafana asume por defecto que SQL Server opera mediante el puerto estándar 1433, sin embargo, en instalaciones basadas en SQL Server Express, el motor TCP/IP utiliza puertos dinámicos, asignados automáticamente. Por esta razón es necesario identificar el puerto exacto utilizado por la instancia.

Este valor se obtiene desde SQL Server Configuration Manager, accediendo a:

- SQL Server Network Configuration
- Protocols for SQLEXPRESS
- TCP/IP (Enabled)

En la pestaña IP Addresses, dentro de la sección IPAll, se muestra el puerto asignado por la instancia, como se indica en la imagen 4.2

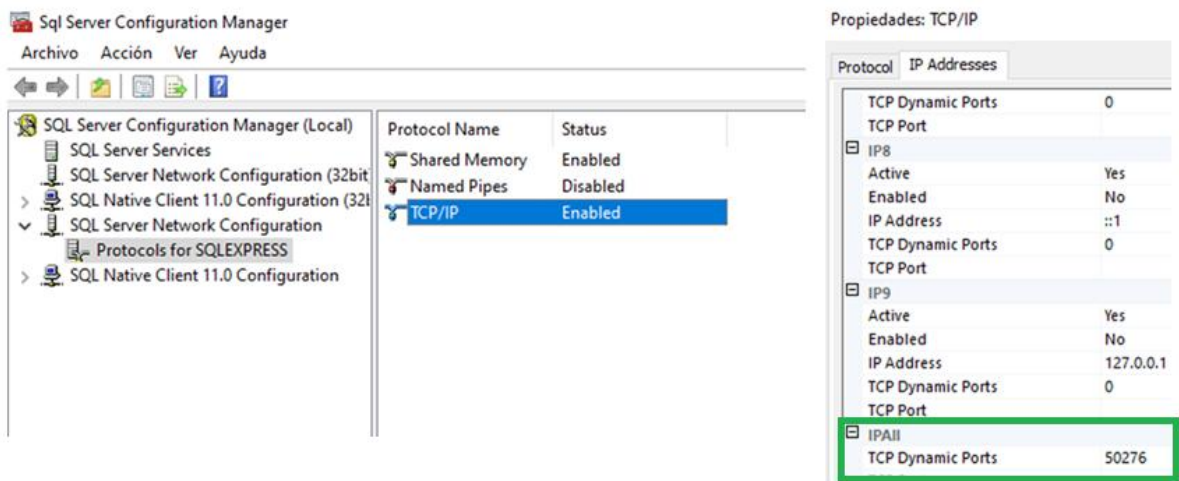


Imagen 4.2 - TCP Dynamic Ports

Para este proyecto, el motor SQL Express opera mediante el puerto 50276, el cual se registra explícitamente en la configuración de *data source* en Grafana.

Al definir la IP 192.168.2.200 y el puerto 50276, junto con la base de datos SGen, la conexión se valida exitosamente mediante la opción *Save & Test*, quedando disponible para consultas y para alimentar las pantallas de visualización.

4.2. Construcción del dashboard energético en Grafana

Con la conexión a la base de datos ya configurada, se construye un dashboard único denominado “SGEn”, que organiza la información en tres bloques principales:

- 1. Variables eléctricas instantáneas.
- 2. Indicador energético (EnPi).
- 3. Totalizadores de producción y energía.
- 4. Registro de alarmas.

La imagen 4.3 presenta una vista general del dashboard completo.



Imagen 4.3 – Visualización de la Interfaz de Usuario del SGen en Grafana

4.2.1. Sección de variables eléctricas instantáneas

En la parte superior del dashboard se agrupan las variables eléctricas instantáneas provenientes de la tabla *LogSGEn*. Esta sección presenta información continua del estado eléctrico del sistema mediante distintos tipos de visualización, entre ellos gráficos de serie temporal, indicadores tipo gauge, barras verticales y paneles tipo stat. La disposición general de estos elementos se muestra en la imagen 4.4.



Imagen 4.4 – Visualización de las Variables Eléctricas Instantáneas

Las variables que evolucionan en el tiempo, como voltaje y corriente, se representan mediante gráficos timeseries, los cuales permiten observar tendencias y variaciones en intervalos prolongados. A modo de referencia, la consulta utilizada para alimentar el gráfico de voltaje es la siguiente:

```
SELECT Voltaje, FechaHora
FROM (
    SELECT TOP(9000)
        Voltaje,
        DATEADD(HOUR, 3, FechaHora) AS FechaHora
    FROM [SGEn].dbo.LogSGEn
```

```

ORDER BY FechaHora DESC
) AS x
ORDER BY FechaHora ASC;

```

La consulta se limita a 9000 registros para evitar sobrecarga y aplica un ajuste horario (*DATEADD(HOUR, 3, FechaHora)*) para corregir un desfase existente entre la marca temporal almacenada en SQL Server y la visualización final en Grafana. Esta estructura se replica en el panel de corriente.

Las magnitudes eléctricas que se desean visualizar de manera instantánea, como la potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y el factor de potencia, se presentan mediante indicadores gauge, los cuales permiten identificar de forma rápida si el valor actual se encuentra dentro de los rangos esperados. Para este tipo de panel, la consulta SQL utilizada se basa en los últimos registros disponibles. Por ejemplo, el gauge de potencia activa utiliza:

```

SELECT
    DATEADD(HOUR, 3, FechaHora) AS time,
    PotAct
FROM (
    SELECT TOP(50)
        FechaHora,
        PotAct
    FROM [SGEn].dbo.LogSGEn
    ORDER BY FechaHora DESC
) AS x
ORDER BY time ASC;

```

Este formato permite obtener un valor actualizado y mantener un refrescamiento liviano para la interfaz.

Los índices de distorsión armónica THDi y THDv se visualizan mediante paneles bar gauge, que representan el nivel actual de distorsión en forma de barra vertical, y resultan útiles para identificar desviaciones respecto a valores típicos.

Finalmente, la frecuencia se presenta mediante un panel tipo stat, el cual muestra únicamente el último valor registrado, facilitando una lectura directa y sin elementos adicionales.

En conjunto, esta sección del dashboard entrega una visualización clara y actualizada de las condiciones eléctricas del sistema, permitiendo al usuario supervisar tendencias, valores instantáneos y posibles anomalías operativas.

4.2.2. Sección de producción mensual, energía mensual y ENPI

En la zona central del dashboard se presenta la información asociada al desempeño energético del sistema, consolidando la producción acumulada por mes, la energía eléctrica consumida y el indicador EnPi (kWh/ton). Esta sección permite visualizar la relación entre el nivel de producción y el consumo energético mensual, siendo fundamental para evaluar la eficiencia energética del proceso simulado. La disposición general de estos elementos se muestra en la imagen 4.5.

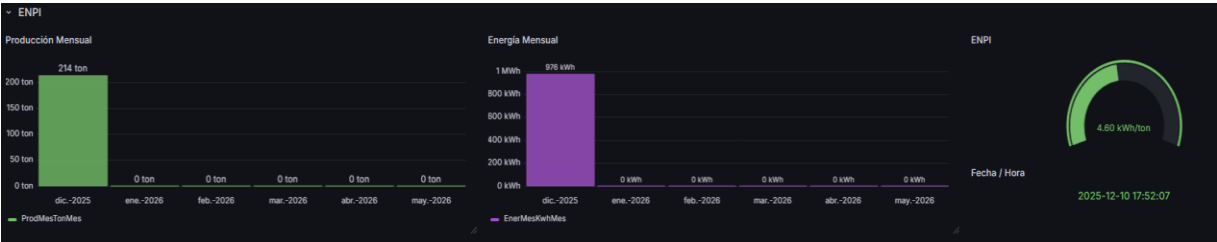


Imagen 4.5 - Indicadores de Producción y ENPI

La producción mensual se representa mediante un gráfico de barras que muestra el valor acumulado para cada mes. Este panel utiliza una consulta SQL que genera explícitamente los meses del periodo a representar, asegurando continuidad incluso cuando existen meses sin registros almacenados. La consulta utilizada es la siguiente:

```
WITH Meses AS (
    SELECT CAST('2025-12-01' AS date) AS Mes
    UNION ALL
    SELECT DATEADD(MONTH, 1, Mes)
    FROM Meses
    WHERE Mes < '2026-05-01'
),
Datos AS (
    SELECT
        DATEFROMPARTS(YEAR(FechaHora), MONTH(FechaHora), 1) AS Mes,
        MAX(ProdMesTon) AS ProdMesTonMes
    FROM [SGEn].dbo.LogEmpi
    GROUP BY DATEFROMPARTS(YEAR(FechaHora), MONTH(FechaHora), 1)
)
SELECT
    M.Mes AS time,
    FORMAT(M.Mes, 'MMM-yyyy', 'es-CL') AS MesTexto,
    ISNULL(D.ProdMesTonMes, 0) / 1000.0 AS ProdMesTonMes
FROM Meses M
LEFT JOIN Datos D ON D.Mes = M.Mes
ORDER BY M.Mes
OPTION (MAXRECURSION 100);
```

En esta consulta se obtiene el valor acumulado de producción para cada mes mediante *MAX(ProdMesTon)* y se normaliza a toneladas dividiéndolo por 1000, permitiendo su visualización de manera clara en el gráfico mensual.

La energía mensual se presenta también mediante un gráfico de barras, utilizando una estructura similar, donde el sistema toma el valor acumulado de energía del mes *EnerMesKwh* y lo asocia al primer día de cada periodo. La consulta utilizada es:

```
WITH Meses AS (
    SELECT CAST('2025-12-01' AS date) AS Mes
    UNION ALL
    SELECT DATEADD(MONTH, 1, Mes)
    FROM Meses
    WHERE Mes < '2026-05-01'
),
Datos AS (
    SELECT
        DATEFROMPARTS(YEAR(FechaHora), MONTH(FechaHora), 1) AS Mes,
        MAX(EnerMesKwh) AS EnerMesKwhMes
    FROM [SGEn].dbo.LogEmpi
    GROUP BY DATEFROMPARTS(YEAR(FechaHora), MONTH(FechaHora), 1)
)
SELECT
    M.Mes AS time,
    FORMAT(M.Mes, 'MMM-yyyy', 'es-CL') AS MesTexto,
    ISNULL(D.EnerMesKwhMes, 0) AS EnerMesKwhMes
FROM Meses M
LEFT JOIN Datos D ON D.Mes = M.Mes
ORDER BY M.Mes
OPTION (MAXRECURSION 100);
```

Este método permite comparar de manera directa la evolución de producción y energía consumida, entregando una base sólida para el análisis energético mensual.

El indicador EnPi mensual (kWh/ton) se visualiza mediante un indicador tipo gauge, que toma el último valor disponible en la tabla *LogEnpi*. Este enfoque simplifica la presentación del desempeño actual sin necesidad de representar una serie temporal completa. La consulta utilizada en este panel es:

```
SELECT TOP(1)
    EmpiMes_kWhTon * 1000 AS EmpiMes_kWhTon_x1000
FROM [SGEn].dbo.LogEmpi
ORDER BY DATEADD(HOUR, 3, FechaHora) DESC;
```

El valor mostrado corresponde al indicador más reciente obtenido por el sistema, ajustado según la metodología de cálculo establecida para el proyecto.

Finalmente, la sección incorpora un panel tipo stat que muestra la hora actual mediante la instrucción:

```
SELECT DATEADD(HOUR, 3, GETDATE()) AS HoraActual;
```

Este elemento facilita verificar la sincronización temporal del dashboard y sirve como referencia visual para el usuario al momento de interpretar los datos representados.

Con esta estructura, el dashboard ofrece una visualización clara y coherente del desempeño energético del sistema, integrando producción, energía y eficiencia en un único bloque de análisis.

4.2.3. Sección de registro de alarmas

En la parte inferior del dashboard se incorpora la sección destinada al registro de alarmas del sistema, la cual permite visualizar de manera rápida los eventos recientes asociados a condiciones anómalas detectadas por el sistema. Esta área se presenta mediante un panel tipo tabla, permitiendo revisar tanto el mensaje de alarma como el contexto eléctrico bajo el cual ocurrió. La disposición de esta sección se muestra en la imagen 4.6.

Alarm Log

Row...	FechaHora	MsgAlarma	Volt...	Corrien...	FP	Pot...	PotRe...	PotAp...	TH...	THDi	Frecuen...
358	2025-12-10 00:20:48	Alarma: Voltaje fuera de rango	232	46.3	0.870	9.36	5.26	10.8	2.90	13.4	49.9
357	2025-12-10 00:10:22	Alarma: Voltaje fuera de rango	232	46.3	0.870	9.36	5.26	10.8	2.90	13.5	50.2
356	2025-12-10 00:07:50	Alarma: Voltaje fuera de rango	232	46.3	0.870	9.36	5.25	10.8	2.90	13.3	50.1
355	2025-12-09 23:49:01	Alarma: Voltaje fuera de rango	231	46.3	0.870	9.37	5.23	10.7	2.80	13.6	50.0
354	2025-12-09 23:42:00	Alarma: Voltaje fuera de rango	231	46.3	0.870	9.38	5.23	10.7	2.80	13.2	50.0

Imagena 4.6 – Visualización del Log de Alarmas en Grafana

La tabla obtiene la información desde la base de datos mediante una consulta SQL dirigida a la tabla *LogAlarmas*, recuperando los eventos más recientes junto con las variables eléctricas vigentes al momento de su activación. El panel presenta columnas para la fecha y hora del evento, el mensaje asociado, y los valores instantáneos de voltaje, corriente, factor de potencia, potencias (Activa, Reactiva y Aparente), distorsiones armónicas y frecuencia, lo que permite comprender el contexto operativo en que se generó la condición de alarma.

La consulta utilizada en este panel es la siguiente:

```
SELECT
    RowID,
    DATEADD(HOUR, 3, FechaHora) AS FechaHora,
    MsgAlarma,
```

```

    Voltaje,
    Corriente,
    FP,
    PotAct,
    PotReact,
    PotApar,
    THDv,
    THDi,
    Frecuencia
FROM (
    SELECT TOP(5)
        RowID,
        FechaHora,
        MsgAlarma,
        Voltaje,
        Corriente,
        FP,
        PotAct,
        PotReact,
        PotApar,
        THDv,
        THDi,
        Frecuencia
    FROM [SGEn].dbo.LogAlarmas
    ORDER BY FechaHora DESC
) AS x
ORDER BY FechaHora ASC;

```

La consulta recupera únicamente los cinco registros más recientes, lo que permite mantener el panel liviano y enfocado en la actividad reciente del sistema.

Este panel constituye la última capa del dashboard y cumple un rol fundamental en la supervisión del sistema, permitiendo identificar rápidamente condiciones de alerta y revisar el estado eléctrico asociado a cada evento sin necesidad de acceder directamente al backend ni a la base de datos.

4.3. Validación del Dashboard del Sistema

La validación del dashboard se realiza verificando la coherencia entre los datos originados en el medidor de energía, la variable productiva proveniente del PLC y la información finalmente visualizada en Grafana. Este proceso asegura que cada etapa del flujo (PLC → Node-RED → SQL → Grafana) funcione de manera consistente.

En primer lugar, se comparan las variables eléctricas mostradas en los gráficos de Grafana con los valores entregados por el analizador Phoenix Contact EEM-MA771. Las tendencias y magnitudes coinciden con el comportamiento real del sistema, confirmando la correcta lectura Modbus, el procesamiento en Node-RED y el almacenamiento íntegro en SQL.

Posteriormente, se validan los acumulados mensuales de energía (kWh) y de producción (ton), los cuales son procesados en Node-RED y almacenados en la tabla *LogEnpi*. Los valores mostrados en los gráficos mensuales de Grafana coinciden con los registros consultados directamente en SQL, evidenciando que no existen desfases ni pérdidas de información. A partir de estos mismos datos se verifica el cálculo del EnPi (kWh/ton), comprobando que la relación entre energía consumida y producción mensual se muestra correctamente en el indicador del dashboard.

Finalmente, se revisa el módulo de alarmas, confirmando que cada evento registrado en SQL aparece en la tabla visual del dashboard sin duplicados, validando así la lógica de control de eventos implementada en el sistema.

En conjunto, estas verificaciones confirman que el dashboard representa de manera fiel el comportamiento del sistema y que la información energética y productiva presentada mantiene trazabilidad completa desde su origen.

CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SGEN

La evaluación económica del Sistema de Gestión Energética (SGEn) permite determinar la conveniencia financiera de su implementación, considerando la inversión inicial, los beneficios energéticos proyectados y los indicadores de rentabilidad. El análisis desarrollado corresponde a una evaluación económica de carácter general, orientada a estimar la conveniencia del proyecto desde una perspectiva práctica, dado que su objetivo principal es dimensionar la viabilidad económica de implementar una plataforma real de gestión energética.

Este enfoque busca evaluar si la infraestructura desarrollada constituye una alternativa económicamente justificable en un escenario industrial real.

Asimismo, se considera como referencia el caso de un cliente industrial con una facturación mensual por consumo eléctrico cercana a \$100 millones de pesos, lo cual entrega un marco adecuado para proyectar ahorros e impactos financieros.

5.1. Inversión Inicial

La inversión inicial corresponde a equipos, materiales de instalación, servicios de ingeniería y costos operativos asociados. La Tabla 5.1 presenta su desglose.

Tabla 5.1 - Inversión Inicial

Ítem	Descripción	Cantidad	Valor Uni (CLP)	Valor Total (CLP)
1	Analizador red Phoenix Contact Empro + Bobinas rogowski	1	\$ 4.750.000	\$ 4.750.000
2	PLC Schneider M221	1	\$ 420.000	\$ 420.000
3	Switch industrial Ethernet	1	\$ 300.000	\$ 300.000
4	Workstation	1	\$ 1.500.000	\$ 1.500.000
5	Materiales eléctricos y montaje	1	\$ 4.000.000	\$ 4.000.000
6	Ingeniería, configuración	1	\$ 3.500.000	\$ 3.500.000
7	Instalación eléctrica y puesta en marcha	1	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000
8	Gastos generales y utilidad del proveedor			\$ 1.856.400
Total inversión inicial				\$ 18.326.400

5.2. Ahorros energéticos proyectados

La estimación de ahorros energéticos se basa en antecedentes reales reportados por la Agencia de Sostenibilidad Energética de Chile, donde empresas certificadas en ISO 50001 han obtenido entre 5% y 20% de reducción del consumo energético, únicamente mediante la gestión sistemática que permite un SGE (AgenciaSE, 2017).

En el contexto del cliente considerado, con una facturación eléctrica cercana a \$100 millones mensuales, incluso el valor mínimo de este rango representa un impacto significativo. Para efectos de este proyecto se adopta un enfoque conservador equivalente a una reducción aproximada del 3% anual, equivalente a \$36.000.000 en ahorro energético anual.

Debido al periodo de puesta en marcha, definición de línea base, KPIs y ajustes del sistema, el primer año se proyecta con un ahorro parcial del 50%, es decir, \$18.000.000.

A partir del segundo año se considera el ahorro completo, coherente con los resultados observados en implementaciones reales de ISO 50001 en Chile.

5.3. Flujo de Caja del Proyecto

El flujo de caja considera todos los ingresos y egresos asociados al proyecto durante su vida útil, integrando la inversión inicial, los ahorros energéticos proyectados, los efectos tributarios, la depreciación y el financiamiento mediante préstamo.

Los elementos incluidos en el flujo son:

- Inversión inicial: \$18.326.400
- Ahorro energético año 1: \$18.000.000 (reducción del 50% por periodo de estabilización)
- Ahorro energético años 2–5: \$36.000.000 anuales
- Depreciación anual: calculada según vida útil del equipamiento
- Impuesto a la renta: 27%
- Financiamiento: préstamo con interés del 1,5% mensual
- Valor residual del sistema: incorporado al finalizar la vida útil

El flujo de caja utilizado corresponde al indicado en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 - Flujo de Caja

Impuesto a las Utilidades		27%				
FLUJO DE CAJA	AÑOS					
	0	1	2	3	4	5
+Ingresos por Ahorro	\$ -	\$ 18.000.000	\$ 36.000.000	\$ 36.000.000	\$ 36.000.000	\$ 36.000.000
-Depreciación MyE		\$ 1.045.500	\$ 1.045.500	\$ 1.045.500	\$ 1.045.500	\$ 1.045.500
-Intereses		\$ 3.100.428	\$ 2.614.510	\$ 2.033.538	\$ 1.338.916	\$ 508.414
=UAI		\$ 13.854.072	\$ 32.339.990	\$ 32.920.962	\$ 33.615.584	\$ 34.446.086
-Impuesto (27%)		\$ 3.740.599	\$ 8.731.797	\$ 8.888.660	\$ 9.076.208	\$ 9.300.443
=Utilidad Neta		\$ 10.113.472	\$ 23.608.193	\$ 24.032.303	\$ 24.539.376	\$ 25.145.642
+Depreciación		\$ 1.045.500	\$ 1.045.500	\$ 1.045.500	\$ 1.045.500	\$ 1.045.500
+Venta de Activos (VL)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 1.742.500
-Amortización		\$ 2.484.013	\$ 2.969.931	\$ 3.550.904	\$ 4.245.525	\$ 5.076.027
-Inversión Inicial	\$ 18.326.400					
- Capital de Trabajo	\$ -					
+Préstamo	\$ 18.326.400					
FCN	\$ -	\$ 8.674.959	\$ 21.683.761	\$ 21.526.899	\$ 21.339.351	\$ 22.857.616

VAN	\$61.658.885
TIR	125%
Tasa descuento	0,15

Este flujo constituye la base para el cálculo del VAN, TIR y Payback.

5.3.1. Indicadores obtenidos

- Valor Actual Neto (VAN): \$61.658.885
El VAN positivo demuestra que el proyecto genera un valor económico muy superior a la inversión inicial, considerando impuestos y descuento financiero.
- Tasa Interna de Retorno (TIR): 125%
La TIR representa la rentabilidad porcentual del proyecto. Un valor de 125% evidencia que el SGE n es altamente rentable, muy por encima del costo del capital y de tasas comerciales habituales.
- Payback (tiempo de retorno de la inversión)
El tiempo de retorno corresponde al periodo necesario para que los flujos netos igualen la inversión inicial.

La fórmula básica utilizada es:

$$\text{Payback simple} = \frac{\text{Inversión Inicial}}{\text{Flujo Neto Anual}}$$

Aplicando los valores del proyecto:

Monto pendiente al finalizar el año 1:

$$\$18.326.400 - \$8.674.959 = \$9.651.441$$

Fracción del año 2 necesaria para recuperar la inversión:

$$\frac{9.651.441}{21.683.761} = 0,45$$

El proyecto recupera su inversión inicial en aproximadamente 1 año y medio, lo que indica una rápida recuperación del capital y un bajo nivel de riesgo financiero.

CAPÍTULO 6. VALIDACIÓN DE DATOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

El presente capítulo tiene como objetivo validar la correcta operación del Sistema de Gestión Energética implementado, asegurando la confiabilidad de los datos desde su adquisición hasta su utilización en el indicador energético (EnPi). La validación se realiza mediante la comparación de los valores obtenidos por el sistema con referencias directas del equipo de medición, la verificación de la integridad de los datos almacenados y la comprobación manual de los indicadores calculados.

Este enfoque permite garantizar que los análisis y decisiones derivados del sistema se basen en información representativa del comportamiento energético real del proceso monitoreado.

6.1. Validación de datos adquiridos y visualizados

La validación de los datos eléctricos se aborda mediante la comparación de las variables medidas por el analizador de red Phoenix Contact con los valores procesados y visualizados en las distintas capas del sistema desarrollado.

Las variables eléctricas principales, voltaje, corriente, potencia activa / reactiva / aparente, factor de potencia, frecuencia, THDv y THDi, se observan en tres niveles: el web server integrado del analizador de red, el backend del sistema implementado en Node-RED y la visualización en la interfaz de usuario.

En la imagen 6.1 se presentan las variables medidas por el analizador de red, visualizadas a través de su web server. En la imagen 6.2 se muestran las mismas variables procesadas y visualizadas en el backend del sistema mediante Node-RED. Finalmente, en la imagen 6.3 se presenta la visualización de estas variables en el dashboard del sistema.

La comparación entre estas tres representaciones se realiza considerando un mismo instante de operación, permitiendo evaluar la correspondencia entre los valores medidos, procesados y visualizados a lo largo de la cadena de adquisición de datos.

La validación se basa en la observación directa de los valores instantáneos y en la verificación de su coherencia, considerando posibles diferencias asociadas a los tiempos de actualización y a la resolución de cada interfaz de visualización.

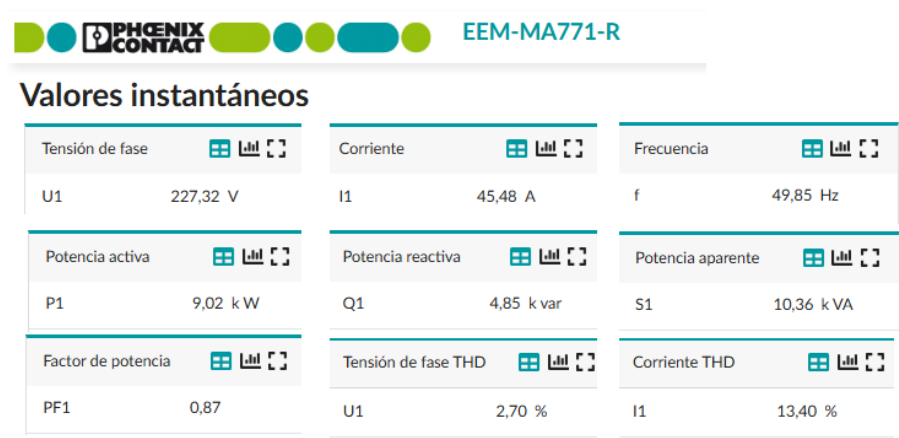


Imagen 6.1- Visualización de Valores Instantáneos Web Server Phoenix Contact

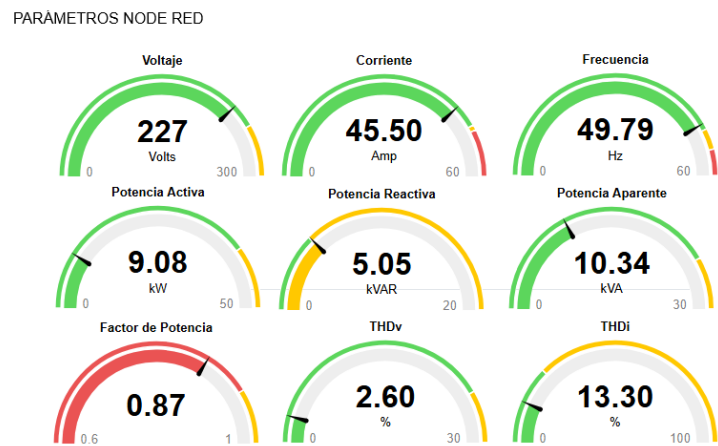


Imagen 6.2 - Visualización de Valores Instantáneos en Node Red

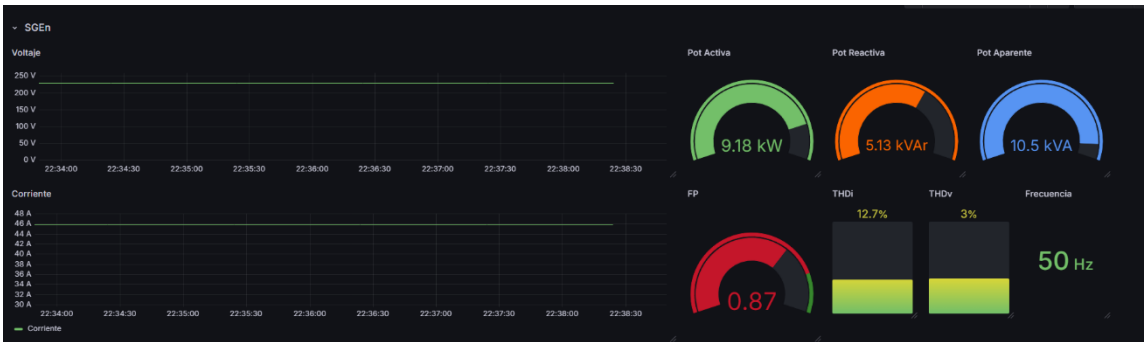


Imagen 6.3 - Visualización de Valores Instantáneos en Grafana

6.2. Validación del almacenamiento y trazabilidad de los datos

La validación del almacenamiento de datos se enfoca en verificar que la información adquirida y procesada por el sistema sea registrada de manera íntegra en la base de datos, permitiendo su trazabilidad en el tiempo y su utilización posterior para análisis energéticos.

Para ello, los valores visualizados en la interfaz de usuario del sistema se contrastan con los registros almacenados en la base de datos SQL, considerando instantes específicos de operación. Esta comparación permite verificar que las variables eléctricas almacenadas,

junto con sus respectivas marcas de tiempo, correspondan a los valores observados en la visualización del sistema.

En la imagen 6.4 se presenta un ejemplo de consulta directa a la base de datos, donde se observan los registros almacenados con su respectiva fecha y hora. Por su parte, en la imagen 6.5 se muestra la visualización de las mismas variables en el dashboard del sistema para el instante correspondiente.

La correspondencia entre ambos conjuntos de datos permite evaluar la continuidad del registro y la correcta secuencia temporal de la información.

Adicionalmente, se revisa que los datos almacenados en la base de datos se registren de forma continua y ordenada en el tiempo, verificando que no existan registros faltantes, valores duplicados ni errores en las marcas de fecha y hora. Esta revisión permite asegurar que la información almacenada sea consistente y pueda utilizarse de manera confiable para el análisis histórico y el cálculo de indicadores energéticos.

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

SELECT TOP (100) [FechaHora]

[Voltaje]

[Frecuencia]

[Corriente]

[FP]

[PotAct]

[PotReact]

[PotApar]

[THDv]

[THDi]

[RowID]

FROM [SGEn].[dbo].[LogSGEn]

ORDER BY [FechaHora] DESC;

100 %

No se encontraron problemas.

Resultados

Mensajes

	FechaHora	Voltaje	Frecuencia	Corriente	FP	PotAct	PotReact	PotApar	THDv	THDi	RowID
1	2025-12-13 23:07:24.177	229	49.98	45.75	0.87	9.2	5.14	10.53	2.7	13.4	24515
2	2025-12-13 23:06:24.120	229	49.94	45.75	0.87	9.21	5.14	10.53	2.7	13.4	24514
3	2025-12-13 23:05:24.110	229	50.19	45.75	0.87	9.16	5.17	10.53	2.7	13.6	24513
4	2025-12-13 23:04:24.230	229	49.98	45.75	0.87	9.16	5.18	10.53	2.7	13.4	24512
5	2025-12-13 23:03:24.190	229	50.18	45.75	0.87	9.16	5.18	10.53	2.7	13.2	24511
6	2025-12-13 23:02:24.080	229	49.88	45.75	0.87	9.18	5.13	10.53	2.7	13.4	24510
7	2025-12-13 23:01:24.183	229	50.16	45.75	0.87	9.21	5.14	10.53	2.7	13.4	24509
8	2025-12-13 23:00:24.197	229	50.17	45.75	0.87	9.21	5.14	10.53	2.7	13.6	24508
9	2025-12-13 22:59:24.053	229	49.97	45.75	0.87	9.17	5.17	10.51	2.6	13.4	24507
10	2025-12-13 22:58:24.657	229	49.87	45.75	0.87	9.18	5.13	10.53	2.7	13.4	24506
11	2025-12-13 22:57:24.070	230	50.04	46	0.87	9.22	5.2	10.57	2.7	13.4	24505
12	2025-12-13 22:56:24.140	230	50.14	46	0.87	9.22	5.22	10.59	2.7	13.8	24504
13	2025-12-13 22:55:24.110	230	50.25	45.75	0.87	9.27	5.16	10.57	2.7	13.4	24503
14	2025-12-13 22:54:24.010	230	50.12	46	0.87	9.25	5.21	10.57	2.7	13.4	24502
15	2025-12-13 22:53:24.090	229	50.22	45.75	0.87	9.25	5.15	10.59	2.7	13.4	24501
16	2025-12-13 22:52:24.020	229	50.1	46	0.87	9.26	5.17	10.59	2.6	13.4	24500
17	2025-12-13 22:51:24.060	230	50.24	45.75	0.87	9.25	5.16	10.59	2.8	13.5	24499
18	2025-12-13 22:50:24.080	229	50.06	46	0.87	9.24	5.16	10.59	2.7	13.4	24498
19	2025-12-13 22:49:24.060	229	50.03	46	0.87	9.23	5.16	10.59	2.7	13.3	24497
20	2025-12-13 22:48:24.053	229	50.23	45.75	0.87	9.23	5.16	10.59	2.8	13.4	24496

Imagen 6.4 - Visualización de Consulta SQL con fecha, hora y variables



Imagen 6.5 - Visualización de Interfaz de Usuario para un mismo instante de tiempo en Grafana

6.3. Validación de indicadores energéticos y del EnPI mensual

La validación de los indicadores energéticos se realiza mediante el análisis de los registros almacenados en la base de datos del sistema y su correspondencia con las visualizaciones presentadas en el dashboard, permitiendo evaluar la coherencia entre las variables base de energía y producción y los indicadores derivados.

En la tabla de registro *LogEnpi*, presentada en la imagen 6.6, se almacenan de forma periódica las variables *ProdMesTon*, correspondiente a la producción acumulada mensual, y *EnerMesKwh*, correspondiente a la energía acumulada del mes obtenida a partir de la suma de los consumos registrados en cada intervalo de medición. Adicionalmente, se registra la variable *EnerTotalEmpro_kWh*, la cual corresponde al valor totalizador de energía

La validación de la energía mensual considera la comparación entre el valor acumulador de energía entregado por el analizador de red y el valor *EnerTotalEmpro_kWh* registrado en la base de datos del sistema. En la imagen 6.7 se presenta la visualización del acumulador de energía del analizador de red mediante su servidor web, mientras que en la imagen 6.8 se muestra el registro correspondiente almacenado en la tabla *LogEnpi* de la base de datos SQL. Esta comparación permite analizar la correspondencia entre la medición directa del equipo y el valor de energía total registrado por el sistema para el mismo periodo de análisis.

De manera análoga, la validación de la producción mensual se realiza a partir del totalizador de producción proveniente desde el PLC. La diferencia entre lecturas consecutivas de este totalizador define la producción del intervalo, y dichos incrementos son los que permiten actualizar progresivamente la variable de producción mensual *ProdMesTon* mediante su acumulación a lo largo del mes. Esta relación entre totalizador, producción por intervalo y producción acumulada mensual se refleja tanto en los registros almacenados en la tabla *LogEnpi* como en la visualización del dashboard del sistema.

A partir de los valores acumulados de energía y producción, el sistema calcula el Indicador de Desempeño Energético mensual *EmpiMes_kWhTon*, definido como la relación entre la energía acumulada del mes y la producción acumulada del mismo periodo, de acuerdo con la expresión:

$$EnPI_{mes} = \frac{EnerMesKwh}{ProdMesTon}$$

Como ejemplo de verificación, se considera un registro correspondiente al periodo analizado, observable en la tabla *LogEnpi*, donde se identifican los valores almacenados

en las columnas *EnerMesKwh* y *ProdMesTon*. Sustituyendo dichos valores en la expresión del indicador se obtiene:

$$EnPI_{mes} = \frac{757,25 \text{ kWh}}{170009 \text{ ton}} \approx 0,0045 \text{ kWh/ton}$$

El valor calculado del EnPI mensual se compara con el registro almacenado en la base de datos, observable en la imagen 6.6, y con su representación en el dashboard del sistema, presentada en la imagen 6.8, donde el indicador se visualiza junto a las variables de energía y producción correspondientes al mismo periodo de análisis

SQLQuery8.sql...SGen (sa (54))*										
SQLQuery3.sql...SGen (sa (60))*										
SQLQuery1.sql...SGen (sa (51))*										
SQLQuery6.sql...GEn (sa (56))*										
<pre>1 SELECT TOP (1000) [FechaHora] 2 ,[Mes] 3 ,[ProdIntervalTon] 4 ,[ProdMesTon] 5 ,[EnerIntervalkWh] 6 ,[EnerMesKwh] 7 ,[EnerTotalEmpro_kWh] 8 ,[EmpiInterval_kWhTon] 9 ,[EmpiMes_kWhTon] 10 ,[RowID] 11 12 FROM [SGEn].[dbo].[LogEnpi] 13 ORDER BY [FechaHora] DESC; 14</pre>										
91 %										
Resultados Mensajes										
	FechaHora	Mes	ProdIntervalTon	ProdMesTon	EnerIntervalkWh	EnerMesKwh	EnerTotalEmpro_kWh	EmpiInterval_kWhTon	EmpiMes_kWhTon	RowID
1	2025-12-18 18:03:11.523	2025-12	71,00	170.009,00	0,17	757,25	9.525,54	0,0024	0,0045	14111
2	2025-12-18 18:02:11.490	2025-12	66,00	169.938,00	0,16	757,08	9.525,37	0,0024	0,0045	14110
3	2025-12-18 18:01:11.480	2025-12	71,00	169.872,00	0,16	756,92	9.525,21	0,0023	0,0045	14109
4	2025-12-18 18:00:11.483	2025-12	66,00	169.801,00	0,16	756,76	9.525,05	0,0024	0,0045	14108
5	2025-12-18 17:59:11.453	2025-12	71,00	169.735,00	0,16	756,60	9.524,89	0,0023	0,0045	14107
6	2025-12-18 17:58:11.510	2025-12	71,00	169.664,00	0,16	756,44	9.524,73	0,0023	0,0045	14106
7	2025-12-18 17:57:11.430	2025-12	66,00	169.593,00	0,16	756,28	9.524,57	0,0024	0,0045	14105
8	2025-12-18 17:56:11.700	2025-12	71,00	169.527,00	0,17	756,12	9.524,41	0,0024	0,0045	14104
9	2025-12-18 17:55:11.597	2025-12	66,00	169.456,00	0,16	755,95	9.524,24	0,0024	0,0045	14103
10	2025-12-18 17:54:11.533	2025-12	71,00	169.390,00	0,16	755,79	9.524,08	0,0023	0,0045	14102
11	2025-12-18 17:53:11.443	2025-12	71,00	169.319,00	0,16	755,63	9.523,92	0,0023	0,0045	14101
12	2025-12-18 17:52:11.623	2025-12	66,00	169.248,00	0,17	755,47	9.523,76	0,0026	0,0045	14100
13	2025-12-18 17:51:11.463	2025-12	71,00	169.182,00	0,16	755,30	9.523,59	0,0023	0,0045	14099

Imagen 6.6 - LogEnpi

Lecturas de contador

Total contador de energía	
Ea+t	8 544,55 k Wh
Ea-t	0,31 k Wh
Er+t	4 639,74 k varh
Er-t	0,24 k varh
Est	9 816,33 k VAh

Imagen 6.7 - Contador Energía EMPRO

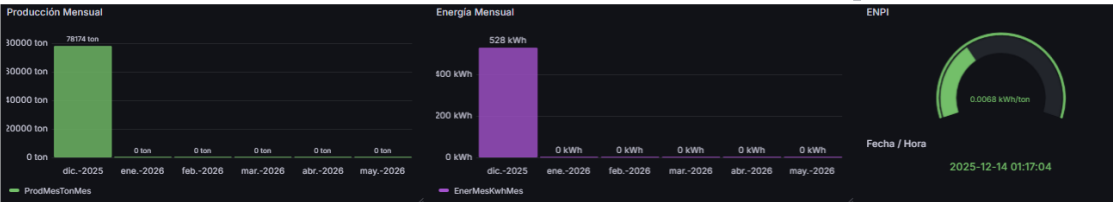


Imagen 6.8 - Dashboard Enpi

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

El desarrollo del presente trabajo de título aborda la implementación de un Sistema de Gestión de Energía Eléctrica desde un enfoque técnico y aplicado, orientado a la adquisición, tratamiento y monitoreo de parámetros eléctricos para su posterior análisis en cuanto a eficiencia energética en un entorno industrial. El objetivo general fue diseñar e implementar una solución que permite apoyar el cumplimiento de la Ley N.º 21.305 sobre Eficiencia Energética en Chile, así como alinearse con los principios y requisitos establecidos en la norma ISO 50001, particularmente en lo relativo al seguimiento del desempeño energético y la mejora continua.

En este contexto, el sistema implementado se plantea como una herramienta fundamental a la gestión energética, basada en la adquisición estructurada de datos eléctricos, su almacenamiento en una base de datos, la simulación de la unidad de producción y el consumo de energía para el cálculo de indicador clave de desempeño (EnPi), y finalmente, la visualización de la información mediante una interfaz gráfica. Los resultados obtenidos permiten evidenciar que la implementación de un SGen no depende únicamente de los equipos de medición, sino también de una arquitectura de software adecuada que asegure la trazabilidad, coherencia y disponibilidad de la información para la toma de decisiones.

Las conclusiones que se presentan a continuación se organizan en función de los objetivos específicos planteados en la investigación, permitiendo evaluar el grado de cumplimiento de cada uno de ellos y su contribución al objetivo general del estudio.

Se logra definir e implementar una arquitectura jerárquica del sistema, organizada en niveles, que permite estructurar eficientemente los elementos de medición, control, integración y gestión de la información energética. Esta organización facilita la interoperabilidad entre dispositivos, la escalabilidad del sistema y una adecuada segregación de funciones entre los distintos niveles. La definición de esta arquitectura, junto con la preparación de la infraestructura de red, permitió disponer de un SGen eficiente.

Se logra desarrollar el backend del Sistema de Gestión de Energía SGen, integrando de forma confiable la adquisición, procesamiento, normalización y el registro de los datos energéticos y productivos. La comunicación mediante Modbus TCP/IP entre el analizador de red, el PLC Modicon M221 y el Gateway basado en Node-RED permite un intercambio de información continuo y bidireccional, asegurando la integridad de los datos en la base de datos SQL. El backend implementado forma una base técnica robusta y escalable.

Se logra implementar exitosamente el frontend del SGEEn mediante la plataforma Grafana, obteniendo una interfaz de usuario compacta y enfocada a la eficiencia energética. La conexión directa con la base de datos SQL Server Express permite la visualización de los registros históricos y en tiempo real, facilitando el análisis del desempeño energético del sistema. En conjunto, el frontend desarrollado transforma los datos procesados por el backend en información comprensible y útil para la toma de decisiones.

Se logra ejecutar pruebas de funcionamiento y validación en todas las etapas del sistema, verificando la comunicación y correcto funcionamiento del flujo completo de datos desde la adquisición en el analizador de red y el PLC, su procesamiento y normalización en Node-RED, el registro histórico en SQL y la visualización final en Grafana. La validación visual preliminar mediante nodos de monitoreo en Node-RED permite confirmar la correcta lectura, decodificación y escalamiento de las variables eléctricas antes de su almacenamiento en la base de datos. Posteriormente, se comprueba que los registros almacenados en SQL reflejan de manera consistente los datos energéticos, productivos y el indicador clave calculado, asegurando la trazabilidad de la información. Finalmente, la validación del dashboard confirma que las variables eléctricas, los acumulados mensuales, el Indicador de Desempeño Energético (EnPi, kWh/ton), el envío de notificación mediante correo electrónico y el registro de alarmas se representan fielmente, sin desfases ni pérdidas de información. En conjunto, estas pruebas demuestran que el sistema opera de forma estable, confiable y consistente, cumpliendo con los fundamentos técnicos de monitoreo, control y mejora continua.

Los resultados de la evaluación económica evidencian que la inversión en la plataforma desarrollada es altamente rentable. Con una inversión inicial de \$18.326.400 y un ahorro estimado de \$18.000.000 para el primer año y \$36.000.000 anuales a partir del segundo año, el proyecto presenta un retorno rápido y consistente.

El análisis del flujo de caja arroja un Valor Actual Neto (VAN) de \$61.658.885, lo que indica que el proyecto genera beneficios económicos significativamente superiores al costo de inversión. De manera complementaria, la Tasa Interna de Retorno (TIR) de 125% demuestra que el SGEEn ofrece una rentabilidad sobresaliente comparada con alternativas de inversión típicas en la industria.

El tiempo de retorno de la inversión (payback) se obtiene aproximadamente en 1 año y medio, incluso aplicando un enfoque conservador que reduce el ahorro del primer año debido a la etapa de estabilización del sistema. Estos resultados confirman que la implementación del SGEEn no sólo contribuye a mejorar el desempeño energético, sino que también representa una inversión financieramente atractiva en el corto plazo.

En comparación con las soluciones tecnológicas analizadas en el estado del arte, tales como Siemens SIMATIC Energy Manager y EMOAC Efficiency, la implementación desarrollada en el presente trabajo de título demuestra ser una alternativa técnicamente

viable, flexible y con una relación costo–beneficio favorable. Las plataformas comerciales existentes se estructuran bajo modelos propietarios y costos elevados tanto en la etapa de implementación como en la etapa de operación, la solución propuesta reduce de manera significativa los límites económicos de adopción, minimiza la dependencia de licencias recurrentes y facilita su implementación en diferentes áreas industriales y comerciales. Igualmente, la arquitectura modular y el tipo de código fuente del sistema permite disminuir la dependencia de fabricantes específicos, otorgando mayor flexibilidad, control, gestión y administración de los datos.

En síntesis, el trabajo desarrollado evidencia que la integración de equipos de medición eléctricos, controladores, protocolos de comunicación y plataformas de análisis y visualización de datos conforma una estrategia efectiva para la implementación de sistemas de gestión de energía en entornos tanto industriales como comerciales. La solución propuesta demuestra que es posible unificar, a partir de tecnologías ampliamente utilizadas en automatización, un sistema capaz de adquirir, procesar, registrar, visualizar y analizar información útil de manera confiable y trazable en cuanto a eficiencia energética.

Finalmente, el sistema desarrollado consolida una base tecnológica para el análisis, la identificación de oportunidades de mejora y la toma de decisiones, fundamentándose con los requerimientos establecidos por la Ley N°21.305 de Eficiencia Energética y los lineamientos de la norma ISO 50001. De este modo, el presente trabajo de título aporta a la solución y abordaje de la problemática energética actual desde la perspectiva de la automatización industrial, ofreciendo una solución escalable y adaptable a distintos contextos productivos.

7.1. Recomendaciones Generales

El sistema desarrollado presenta una arquitectura modular y escalable que permite su ampliación progresiva en un entorno tanto industrial como comercial. Cada capa de la arquitectura del sistema: medidor, controlador, backend y frontend pueden escalarse, facilitando la incorporación de otros protocolos de comunicación, arquitectura de hosting e indicadores de eficiencia energética. En base a lo anterior, se formulan las siguientes recomendaciones para cada alcance futuro:

Ampliación del alcance energético del sistema.

El sistema está diseñado inicialmente para monitorear energía eléctrica; sin embargo, su arquitectura modular permite su escalabilidad hacia otras fuentes de energía, tales como gas natural, aire comprimido, vapor, agua, combustibles líquidos, biomasa, entre otros, entendida como la capacidad del sistema para ampliarse sin pérdida de rendimiento. La integración de estas fuentes viabiliza una visión integral del desempeño energético, en cohesión con los principios de la Ley 21.305 y los fundamentos de la norma ISO 50001.

Expansión de herramientas con licenciamiento.

Si bien la implementación actual se basa exclusivamente en software gratuito o de código abierto, lo cual facilita el acceso y la replicabilidad, se recomienda considerar el uso de herramientas/software/Bases de datos con licenciamiento para aumentar sus capacidades de ampliación, en cuanto a capacidad de almacenamiento de registros históricos, capacidad de cantidad de tags, entre otros.

Implementación de arquitectura de hosting en la nube.

La solución desarrollada es completamente On-Premise. Para futuras versiones podría considerarse su migración parcial o total hacia plataformas en la nube (Azure, AWS o Google Cloud), habilitando redundancia, alta disponibilidad, acceso remoto seguro, procesamiento distribuido y capacidades de almacenamiento ampliado para análisis de registros históricos.

Desarrollo de indicadores de desempeño energético.

Además del indicador implementado (kwh/ton), el sistema puede expandirse incorporando indicadores claves, tales como:

- kWh/m² en áreas con climatización.
- kWh/m³ de agua bombeada.
- kWh/Nm³ de aire comprimido.
- Factor de carga y factor de demanda.
- Indicadores mixtos energía–productividad (energía/OEE).
- Índices de eficiencia energética por línea o centro de costo.

Además, se puede considerar la integración del cálculo de calidad de la energía como un indicador energético de apoyo o complementario, porque permite evaluar el desempeño eléctrico y la estabilidad de la instalación conforme a la norma de ISO 50001.

Integración de modelos de Machine Learning e Inteligencia Artificial.

El sistema puede escalar hacia capacidades predictivas utilizando técnicas de IA, tales como, modelos de series temporales, redes neuronales y aprendizaje supervisado, permitiendo:

- Predicción de consumo energético por turno, línea, proceso, entre otros.
- Detección avanzada de patrones irregulares.
- Optimización operativa basada en recomendaciones inteligentes.
- Construcción dinámica de líneas base energéticas ajustadas por producción, estacionalidad o carga térmica.

- Diagnóstico predictivo de fallas eléctricas o mecánicas basadas en el comportamiento energético.

Fortalecimiento de la ciberseguridad industrial.

La comunicación entre PLC, Gateway, base de datos y plataformas de visualización requiere medidas de protección adicionales para su uso en entornos críticos: segmentación de redes OT/IT, cifrado de extremo a extremo, firewalls industriales, autenticación reforzada y gestión de credenciales.

Automatización de reportes y auditoría energética.

Con la información almacenada en SQL Server, puede añadirse un módulo automático de generación de reportes (PDF, Excel o dashboards específicos) para auditorías internas y externas conforme a ISO 50001 y a las exigencias de la Ley 21.305.

Integración con sistemas corporativos.

El SGEN puede vincularse con plataformas ERP, MES, SCADA o sistemas de mantenimiento (CMMS), permitiendo correlacionar energía, producción y costos operacionales, potenciando el análisis integral de eficiencia energética.

En síntesis, la escalabilidad permite habilitar la evolución del sistema hacia una plataforma más inteligente, segura, expansible y capaz de no solo reportar el desempeño energético eléctrico, sino de integrar otras fuentes de energía, ampliar su capacidad, además de reportar ineficiencias y adelantarse a la predicción de problemas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia de Sostenibilidad Energética. (s.f.). *Guía de implementación de sistemas de gestión de la energía ISO 50001*. <https://www.guiaiso50001.cl/>

EMOAC. (s.f.). *EMOAC Efficiency: Plataforma integral de gestión energética*.

Grafana Labs. (s.f.). *Grafana documentation*. <https://grafana.com/docs/>

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2010). *IEEE Standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions* (IEEE Std 1459-2010). IEEE.

International Organization for Standardization. (2018). *Energy management systems — Requirements with guidance for use* (ISO Standard No. 50001:2018).

Microsoft. (s.f.). *SQL Server Express Edition: Documentación técnica*. <https://www.microsoft.com/es-cl/sql-server/>

Ministerio de Energía. (2021, 13 de febrero). *Ley 21.305: Sobre eficiencia energética*. Diario Oficial de la República de Chile.

Node-RED. (s.f.). *Node-RED: Low-code programming for event-driven applications*. OpenJS Foundation. <https://nodered.org/>

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2012). Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética. *Diario Oficial de la Unión Europea*.

Phoenix Contact. (s.f.). *Energy meter - EEM-MA771 - 2907953: Hoja de datos técnica*.

Rockwell Automation. (s.f.). *Stratix 2000 Unmanaged EtherNet/IP Switch - 1783-US16T: Datos técnicos*.

Sanny32. (s.f.). *OpenModScan* [Software de ordenador]. GitHub. <https://github.com/sanny32/OpenModScan>

Schneider Electric. (s.f.). *Modicon M221 Logic Controller - TM221C24R: Manual de usuario*.

Siemens. (s.f.). *SIMATIC Energy Manager: Energy management systems*.