TEC | Tecnológico de Costa Rica

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

Plycem®
Tecnología de Avanzada en Fibrocemento

PROYECTO:

"Desarrollo de un sistema mantenimiento basado en condición con la incorporación de indicadores de sostenibilidad energética para el proceso productivo de fibrocemento en la empresa Plycem bajo el concepto IoT"

INFORME DE PRÁCTICA DE ESPECIALIDAD PARA OPTAR POR EL TÍTULO:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL, GRADO LICENCIATURA

REALIZADO POR:

Israel Alberto Zamora Vega

CARTAGO, I SEMESTRE

Junio 2022

engineerscanada ingénieurscanada

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Profesor guía:

Ing. Juan José Montero Jiménez

Asesor Industrial

Ing. Carlos Vindas Barboza

Tribunal examinador

Ing. Felipe Córdoba

Ing. Luis Gómez

Plycem® una empresa de elementia®

Señor: Ing. Ignacio Del Valle Granados. **Fecha: 27/10/2021**

Cargo: Coordinador de la Práctica Profesional.

Carrera: Ingeniería en Mantenimiento Industrial.

Entidad: Instituto Tecnológico de Costa Rica, TEC.

Por este medio, Plycem Construsistemas S.A, hace constar que el estudiante Israel Zamora Vega, cédula de identidad número 305020559, numero de carné 2016242702 ha sido autorizado a realizar su práctica profesional para optar por el título de grado de licenciatura en Mantenimiento Industrial, de la Escuela de Ingeniería Electromecánica, desarrollando el proyecto: *Desarrollo de un sistema de mantenimiento basado en condición con la incorporación de indicadores de sostenibilidad energética para el proceso productivo de fibrocemento en la empresa Plycem bajo el concepto IoT.* Para ser desarrollado en nuestro departamento de Mantenimiento, bajo la supervisión del Jefe de Mantenimiento, el Sr. Carlos Vindas Barboza.

Este proyecto será de relevancia para el departamento, ya que ayudará al conocimiento de la influencia del mantenimiento basado en la condición en el rendimiento energético de la organización, además de impulsar hacia el uso y aplicación de nuevas tecnologías relacionadas al IoT. Es importante recalcar que para dicho proyecto NO se requiere confidencialidad.

Hacemos constar que esta práctica profesional tendrá una duración de 4 meses aproximadamente, iniciando el próximo 8 de febrero de 2022 con una jornada de 36 horas semanales como lo solicita el TEC.

Atentamente,

Carlos Vindas Barboza.

Jefe de mantenimiento.

Departamento de mantenimiento

Correo: cvindas@elementia.com Teléfono: 71022969

/Experto Plycem

www.plycem.com

Información del estudiante y la empresa

1. **Datos personales**

Nombre completo: Israel Alberto Zamora Vega.

Número de cédula: 305020559

Número de carné: 2016242702

Edad: 24

Números de teléfono: (+506) 71512394

Correos electrónicos: israelzv17@gmail.com, iszamora@estudiantec.cr

Dirección exacta de domicilio: Tucurrique, Cartago, Costa Rica.

2. **Datos de la Empresa**

Nombre: Plycem Construsistemas S.A.

Actividad Principal: Fabricación de productos a base de fibrocemento.

Dirección: 5 km Este de la Basílica de Los Ángeles, Cartago, Costa Rica

Contacto: Carlos Vindas Barboza, jefe de mantenimiento.

Teléfono: 71022969

Dedicatoria.

A mis padres, Alberto Zamora Brenes y Lucrecia Vega Rodríguez, por todo el apoyo y amor incondicional a lo largo de mi etapa en la universidad y cada una de las etapas de mi vida, ya que gracias a su trabajo, dedicación y sacrificio he llegado hasta este punto.

A mi hermano, Juan Pablo Zamora Vega, por el apoyo y por ser un punto de motivación.

Agradecimientos.

A toda mi familia, por el apoyo durante todo este trayecto.

A Dios.

A mis amigos, por ser esa cuota de diversión necesaria y por siempre estar cuando los necesité.

A Plycem construsistemas S.A., por darme la oportunidad de realizar mi trabajo final de graduación en su compañía.

A los profesores del TEC, por brindarme su conocimiento para mi formación profesional.

Al profesor Ing. Carlos Piedra Santamaría, por los consejos, apoyo y la disposición desde el planteamiento hasta el desarrollo de este proyecto.

A mi profesor guía, Ing. Juan José Montero Jiménez, por las recomendaciones y la retroalimentación a lo largo de todo el proyecto.

Al todo el Departamento de Mantenimiento de Plycem construsistemas S.A, especialmente al Ing. Jermie Vargas y a mi asesor industrial Ing. Carlos Vindas, por la ayuda, conocimiento brindado y disposición durante el desarrollo del proyecto.

A mi novia, por siempre apoyarme y motivarme a salir adelante y dar lo mejor.

Índice Principal.

1. RESUMEN 14

2. ABSTRACT 15

3. INTRODUCCIÓN 16

3.1. Introducción 16

3.2. Reseña de la empresa. 18

4. ANTECEDENTES. 20

4.1. Antecedentes teóricos. 20

4.2. Antecedentes de campo. 22

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. 23

6. OBJETIVOS. 25

6.1. Objetivo general. 25

6.2. Objetivos específicos. 25

7. JUSTIFICACIÓN. 26

8. VIABILIDAD 32

9. ALCANCE 33

10. LIMITACIONES 34

11. MARCO TEÓRICO 35

12. METODOLOGÍA. 49

13. PLAN DE TRABAJO. 49

14. ANÁLISIS ENERGÉTICO Y BALANCE DE ENERGÍA 50

14.1. Reconocimiento de la empresa y equipos. 50

14.2. Análisis del consumo general de energía. 60

14.3. Análisis del uso y consumo de GLP. 64

14.4. Análisis del uso y consumo de electricidad 67

14.5. Análisis del uso y consumo de diésel. 71

14.6. Análisis de los Usos Significativos de Energía. 74

15. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLO, EFECTOS Y CRITICIDAD. 83

16. MONITOREO DE CONDICIÓN EN TIEMPO REAL 91

16.1. Descripción general y arquitectura del sistema. 91

16.2. Equipos para el monitoreo de la condición. 93

16.3. Adquisición de la información y cálculo de pérdidas de calor en las paredes. 94

16.4. Comparación con el consumo energético. 113

17. ANÁLISIS ECONÓMICO. 118

18. CONCLUSIONES. 123

19. RECOMENDACIONES Y OPORTUNIDADES DE MEJORA. 125
20. REFERENCIAS. 127
21. ANEXOS. 136

Índice de tablas.

TABLA 1. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA DEL PROYECTO. 24
TABLA 2. CONSUMO ANUAL HISTÓRICO DE ENERGIA EN MEGAJOULE. 61
TABLA 3. FACTURACIÓN SEGÚN TIPO DE ENERGÍA. 62
TABLA 4. CONSUMO ANUAL HISTÓRICO DE GLP EN MEGAJOULE NIVEL 1 64
TABLA 5. CONSUMO ANUAL HISTÓRICO DE GLP EN MEGAJOULE NIVEL 2 65
TABLA 6. CONSUMO ANUAL HISTÓRICO DE ELECTRICIDAD EN MEGAJOULE NIVEL 1 67
TABLA 7. CONSUMO ANUAL HISTÓRICO DE ELECTRICIDAD EN MEGAJOULE NIVEL 2 69
TABLA 8. CONSUMO ANUAL HISTÓRICO DE DIÉSEL EN MEGAJOULE NIVEL 2 72
TABLA 9. CONSUMO ANUAL HISTÓRICOS PARA LOS USES. 75
TABLA 10. PRECIO POR LITRO DE GLP MENSUAL PARA PLYCEM S.A. 77
TABLA 11. LITROS DE GLP CONSUMIDOS POR CADA TONELADA PRODUCIDA Y COSTOS ENERGÉTICOS POR CADA TONELADA EN EL HORNO 1. 78
TABLA 12. PORCIÓN DE MUESTRA DEL ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA, EFECTO Y CRITICIDAD PARA EL HORNO 2. 86
TABLA 13. PORCIÓN DEL ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA, EFECTO Y CRITICIDAD DE LOS AISLAMIENTOS. 89
TABLA 14. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO PARA EL ASILANTE DEL HORNO 2. 89
TABLA 15. COSTOS ASOCIADOS A PÉRDIDAS DE CALOR EN LA HORNILLA 119
TABLA 16. AFECTACIÓN ECONÓMICA AL OPERAR CON UN AISLANTE DETERIORADO. 119
TABLA 17. EVALUACIÓN FIANCIERA DEL PROTOTIPO DE PARA EL MONITOREO EN TIEMPO REAL. 122
TABLA A1. METODOLOGÍA 136
TABLA A2. PLAN DE TRABAJO. 137
TABLA A3. LITROS DE GLP CONSUMIDOS POR CADA TONELADA PRODUCIDA Y COSTOS ENERGÉTICOS POR CADA TONELADA EN EL HORNO 2. 138
TABLA A4. LITROS DE GLP CONSUMIDOS POR CADA TONELADA PRODUCIDA Y COSTOS ENERGÉTICOS POR CADA TONELADA EN EL HORNO 3. 139
TABLA A5. HISTORIAL DE FALLAS REPORTADAS EN EL 2021 PARA EL HORNO 2. 141
TABLA A6. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA, EFECTO Y SU CRITIRICIDAD PARA EL HORNO 2. 142
TABLA A7. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA, EFECTO Y SU CRITIRICIDAD PARA EL AISLAMIENTO DEL HORNO 2. 156
TABLA A8. EQUIPOS Y SENSORES REQUERIDOS PARA EL MONITOREO DE LA CONDICIÓN DEL AISLAMIENTO DE LA HORNILLA. 158

Índice de figuras.

FIGURA 1. DIAGRAMA DE FLUJO PARA ZONA DE FIBRAS 52
FIGURA 2. DIAGRAMA DE FLUJO PRIMERA ETAPA DE PRODUCCIÓN PRIMARIA 53
FIGURA 3. DIAGRAMA DE FLUJO SEGUNDA ETAPA DE PRODUCCIÓN PRIMARIA. 54
FIGURA 4. DIAGRAMA DE FLUJO PRODUCCIÓN SECUNDARIA. 59
FIGURA 5. DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO TOTAL POR TIPO DE ENERGÍA. 61
FIGURA 6. FACTURACIÓN DEL CONSUMO ENERGÍA PARA EL AÑO 2021. 63
FIGURA 7. DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO DE GLP SEGÚN USO DE LA ENERGÍA NIVEL 1. 66
FIGURA 8. DIAGRAMA DE PARETO PARA LOS EQUIPOS CONSUMIDORES DE GLP. 67
FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO DE ELECTRICIDAD SEGÚN USO DE LA ENERGÍA NIVEL 2. 70
FIGURA 10. DIAGRAMA DE PARETO PARA LOS EQUIPOS CONSUMIDORES DE ELECTRICIDAD. 71
FIGURA 11. DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO DE DIÉSEL SEGÚN USO DE LA ENERGÍA NIVEL 2. 73
FIGURA 12. DIAGRAMA DE PARETO PARA LOS EQUIPOS CONSUMIDORES DE DIÉSEL. 74
FIGURA 13. DIAGRAMA DE PARETO PARA LOS EQUIPOS DE MAYOR CONSUMO DE ENERGÍA. 76
FIGURA 14. COMPORTAMIENTO HISTÓRICO DEL CONSUMO DE LITROS DE GLP POR TONELADA PRODUCIDA 79
FIGURA 15. LITROS DE GLP POR CADA TONELADA PRODUCIDA PARA CADA HORNO. 80
FIGURA 16. COSTOS DE FACTURACIÓN DE GLP POR CADA TONELADA PRODUCIDA EN LOS HORNOS 81
FIGURA 17. EQUIPOS DEL HORNO 2 CON MAYOR CANTIDAD DE HORAS DE PARO 84
FIGURA 18. DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DE LAS SECCIONES DEL HORNO. 88
FIGURA 19. ARQUITECTURA DEL MONITOREO DE LA CONDICIÓN EN TIEMPO REAL PROPUESTO. 91
FIGURA 20. DIAGRAMA DESCRIPTIVO DE LA HORNILLA Y UBICACIÓN DE SENSORES. 94
FIGURA 21. RELACIONES DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR SEGÚN EL CONCEPTO DE RESISTENCIAS TÉRMICAS 96
FIGURA 22. MODELO DE RESISTENCIAS TÉRMICAS PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR DESDE LA PARED AL AMBIENTE 97
FIGURA 23. DIAGRAMA DE BLOQUES RECEPCIÓN DE DATOS DE PARED OESTE. 102
FIGURA 24. DIAGRAMA DE BLOQUES OBTENCIÓN DE LA TABLA CON LOS DATOS DE LAS PROPIEDADES DEL AIRE. 104
FIGURA 25. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA OBTENCIÓN DE LOS VALORES DE LAS PROPIEDADES DEL AIRE. 105
FIGURA 26. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CÁLCULO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD. 106
FIGURA 27. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA GENERACIÓN DE ALERTAS POR EL DETERIORO DEL AISLAMIENTO 108
FIGURA 28. INTERFAZ DE MONITOREO PARA LA PARED OESTE DE LA HORNILLA. 109
FIGURA 29. ALERTA DE CORREO ELECTRÓNICO DE LA PARED OESTE. 110
FIGURA 30. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA EL ALMACENAMIENTO DE LOS DATOS DE LA PARED OESTE. 111
FIGURA 31. DATOS ALMACENADOS EN EL DOCUMENTO DE EXCEL GENERADO. 112
FIGURA 32. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA MEDICIÓN DE CONSUMO DE GLP Y PERDIDAS DE CALOR EN LA HORNILLA. 113
FIGURA 33. DIAGRAMA DE ALMACENAMIENTO DE DATOS Y ALERTAS PARA LA HORNILLA. 114

FIGURA 34. INTERFAZ PARA LA HORNILLA. 116
FIGURA A1. COMPORTAMIENTO HISTÓRICO DEL CONSUMO DE LITROS DE GLP POR TONELADA PRODUCIDA PARA EL HORNO 2. 138
FIGURA A2. COMPORTAMIENTO HISTÓRICO DEL CONSUMO DE LITROS DE GLP POR TONELADA PRODUCIDA PARA EL HORNO 3. 139
FIGURA A3. PLACA CARACTERÍSTICA DEL QUEMADOR DEL HORNO 1. 140
FIGURA A4. PLACA CARACTERÍSTICA DEL QUEMADOR DEL HORNO 2. 140
FIGURA A5. PLACA CARACTERÍSTICA DEL QUEMADOR DEL HORNO 3. 141
FIGURA A6. LONGITUD CARACTERÍSTICA Y NÚMERO DE NUSSELT PARA LA CONVECCIÓN NATURAL 159
FIGURA A7. PROPIEDADES DEL AIRE A DIFERENTES TEMPERATURAS 160
FIGURA A8. PRIMERA SECCIÓN DE CÓDIGO PARA LA PARED ESTE. 161
FIGURA A9. SEGUNDA SECCIÓN DE CÓDIGO PARA LA PARED ESTE. 162
FIGURA A10. INTERFAZ PARA LA PARED ESTE. 163
FIGURA A11. PRIMERA SECCIÓN DE CÓDIGO PARA LA PARED NORTE. 164
FIGURA A12. SEGUNDA SECCIÓN DE CÓDIGO PARA LA PARED NORTE. 165
FIGURA A13. INTERFAZ PARA LA PARED NORTE. 166
FIGURA A14. PRIMERA SECCIÓN DE CÓDIGO PARA LA PARED SUR. 167
FIGURA A15. SEGUNDA SECCIÓN DE CÓDIGO PARA LA PARED SUR. 168
FIGURA A16. INTERFAZ PARA LA PARED SUR. 169
FIGURA A17. PRIMERA SECCIÓN DE CÓDIGO PARA EL TECHO. 170
FIGURA A18. SEGUNDA SECCIÓN DE CÓDIGO PARA EL TECHO. 171
FIGURA A19. INTERFAZ PARA EL TECHO. 172
FIGURA A20. COTIZACIÓN DE LOS QUIPOS NECESARIOS PARA EL PROTOTIPO PARA EL MONITOREO DE LA CONDICIÓN 173
FIGURA A21. SALARIOS PARA EL SECTOR PRIVADO 174

Índice de ecuaciones

ECUACIÓN 1. COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN 97
ECUACIÓN 2. TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN. 97
ECUACIÓN 3. TEMPERATURA DE PELÍCULA. 98
ECUACIÓN 4. COEFICIENTE DE EXPANSIÓN VOLUMÉTRICA 98
ECUACIÓN 5. NUMERO DE RAYLEIGH. 98
ECUACIÓN 6. NUMERO DE NUSSELT PARA PARED VERTICAL 99
ECUACIÓN 7. NUMERO DE NUSSELT PARA PARED HORIZONTAL. 99
ECUACIÓN 8. COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN. 99
ECUACIÓN 9. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN. 99
ECUACIÓN 10. TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL DESDE LA PARED AL AMBIENTE. 99
ECUACIÓN 11. COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA. 100

1. Resumen

El sector industrial es el segundo sector con mayor consumo energético en Costa Rica, además, los resultados de algunas investigaciones muestran que el mantenimiento basado en la condición puede tener una influencia positiva en la gestión energética, para este proyecto se tiene como objetivo establecer esa correlación entre el mantenimiento basado en la condición y el rendimiento energético para un sistema electromecánico en la compañía Plycem Construsistemas S.A. En este trabajo se realiza un análisis de la situación energética, a partir de la base de datos de la compañía y el balance energético disponible, con esto se identifican los sistemas electromecánicos de mayor impacto energético, de los cuales se selecciona uno de los hornos, después de realizar un análisis comparativo por consumo, costos y toneladas producidas. Además, se desarrolla una Análisis de Modos de Falla, Efecto y Criticidad (AMFEC) para el horno seleccionado, utilizando como guía la norma IEC 60812:2018 y para establecer el componente para ser monitoreado en tiempo real, para esto se considera la influencia en la productividad y el rendimiento energético del horno; también se definen los parámetros a monitorear y el índice de salud para evaluar la condición del componente. Además, como parte de este proyecto se plantea un prototipo del sistema de monitoreo, esto se realiza a través de una simulación con el software LabVIEW donde se cuenta con una interfaz donde se muestran los datos monitoreados, también la estructura para el almacenamiento de los datos para su futuro análisis y tiene la capacidad de generar alarmas cuando se superen los umbrales de funcionamiento establecidos. Como parte final del proyecto, se desarrollan estimaciones de pérdidas económicas por concepto de consumo energético que pueda provocar el horno al trabajar con un aislamiento deteriorado que se podrían prevenir con una intervención oportuna implementando un monitoreo de la condición.

Palabras clave: Monitoreo de condición en tiempo real, Energía, Eficiencia, Impacto económico, aislamiento térmico.

2. Abstract

The industrial sector is the second sector with the highest energy consumption in Costa Rica, in addition, the results of some investigations show that the condition based maintenance can have a positive influence on the energy management , for this project the objective is to establish that correlation between the condition based maintenance and the energy performance for an electromechanical system in the company Plycem Construsistemas S.A. In this work, it is done an analysis of the energetic situation, from the data base of the company and the available energetic balance, with this, it can be identified the electromechanics systems of the major energetic impact, from this, one of the furnaces is selected, after doing a comparative analysis by consume, cost and produced tons. Besides, it is developed a Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA) for the chosen furnace, using as guide the standard IEC 60812:2018 and for establishing the component for being monitored in real time, for this it is considered the influence in the productivity and the energetic performance of the furnace; the parameters to be monitored and the health index to evaluate the condition of the component are also defined. Furthermore, as part of this project, it is presented a prototype of the monitoring system, this is done through a simulation with the software LabVIEW where it has an interface where it is shown the monitored data, also the structure for then data storage for its future analysis, and it is capable of generating alarms when the established functioning thresholds are surpassed. Finally, it is developed some estimates of economic loss due to energetic consume that the oven could cause while working with a deteriorated thermal insulation which can be prevented with a pertinent intervention implementing a condition monitoring.

Keywords: Condition monitoring in real time, energy, efficiency, economic impact, thermal isolation.

3. Introducción

3.1. Introducción

La industria manufacturera a nivel mundial representa uno de los sectores de mayor impacto energético y en Costa Rica esto no es una excepción siendo el segundo sector con mayor consumo energético principalmente por la influencia de la industria manufacturera. Una parte fundamental de la industria es el mantenimiento de los activos de la misma, ya que el mantenimiento influye directamente en la cadena de valor de una organización, sin embargo, no siempre se considera la relevancia que tiene le mantenimiento industrial sobre la gestión energética y como finalmente influye en la competitividad de una organización.

En algunas organizaciones no se conoce con certeza el impacto económico que tiene el mantenimiento industrial en relación con la gestión energética, de esa necesidad se plantea el desarrollo de este proyecto, abordando esta problemática desde un mantenimiento basado en condición que también involucre indicadores de sostenibilidad. El mantenimiento basado en la condición (CBM, por sus siglas en inglés) incorporan herramientas con enfoque hacia la aplicación de la industria 4.0, estas tecnologías ofrecen un sistema de medición más confiable y robusto que ayuda a realizar un mantenimiento más inteligente protegiendo los intereses económicos del negocio.

También es importante mencionar que a nivel nacional existen algunas iniciativas y objetivos que se alinean con la sostenibilidad y reiteran la importancia del uso eficiente de los recursos energéticos como es el caso del Plan Nacional de Energía presentado por el Ministerio de Ambiente y Energía (2015) de Costa Rica o el Plan Nacional de Descarbonización presentado también por Ministerio de Ambiente y Energía (2018) de Costa Rica, también a nivel internacional diversas organizaciones en pro de la sostenibilidad establecen metas mundiales que involucran a diversos sectores y entre ellos incluido el sector industrial, por ejemplo los objetivos para el desarrollo sostenible presentados por la Organización de las Naciones Unidas (2018).

Para el desarrollo de este proyecto, se requiere en primer instancia tener un conocimiento adecuado de la situación de la empresa en relación con los tipos de energía utilizadas, el uso que se le da a la energía en las diferentes áreas de la empresa y el proceso productivo como tal, conocer el consumo de cada tipo de energía en cada sector y establecer a partir de ese análisis aquel o aquellos sistemas electromecánicos que representan un impacto importante en el consumo energético para la compañía.

Los sistemas electromecánicos pueden estar compuestos por varios sub sistemas y componentes con funciones y condiciones de operación distintas, pero que trabajan en conjunto para un mismo fin, sin embargo, cada uno de estos componentes puede degradarse y dañarse de manera distinta teniendo, asimismo, una afectación sobre el sub sistema y sistema en general distinta para cada componente y tipo de falla, una de las alternativas para poder analizar lo anterior es a través de un Análisis de Modos de Falla, Efecto y Criticidad para esto existen normas internacionales que describen el proceso para llevar a cabo este análisis como es el caso de la norma IEC 60812:2018. Al tratar de relacionar el mantenimiento industrial con el rendimiento energético, entonces se vuelve importante considerar el efecto que pueda tener una falla no solo en la producción o calidad de un producto, también es importante considerar como puede llegar a afectar el consumo y eficiencia energética del equipo o sistema electromecánico.

El mantenimiento de un activo puede abordarse desde diversas técnicas, sin embargo, el mantenimiento basado en la condición incorpora tecnologías que permiten realizar un mejor mantenimiento, una de las herramientas de esta técnica es el monitoreo en tiempo real de la condición de un equipo o componente y con la capacidad de alertar al usuario cuando el comportamiento de las variables monitoreadas no es el adecuado. Además, del almacenamiento de la información para que posteriormente pueda ser examinada.

Como todo proyecto, siempre es importante evaluar el impacto económico que puede llegar a tener el desarrollo del mismo, para la última parte de este proyecto, se realiza un análisis económico donde el mayor

interés está en cómo puede llegar a variar la facturación por concepto de consumo de energía con el desarrollo de este tipo de alternativas en el mantenimiento.

3.2.Reseña de la empresa.

Plycem Construsistemas S.A., se dedica a desarrollar y perfeccionar la tecnología de productos en fibrocemento que se utilizan en construcción, ampliación y remodelación residencial o comercial, fabrica productos como cubiertas para techo, cielos o losetas, entrepisos, paredes, fachadas, entre otros. Se fundó en 1964 en Costa Rica y se ubica 5 km Este de la Basílica de Los Ángeles, Cartago, Costa Rica.

En la actualidad pertenece al consorcio mexicano Elementia, que cuenta con más de 30 plantas de producción en la región, las cuales fabrican productos de fibrocemento, cemento, polietileno, estireno, cobre y aluminio. Plycem Construsistemas S.A. (2021).

Visión.

Ser el proveedor preferido de la industria de la construcción.

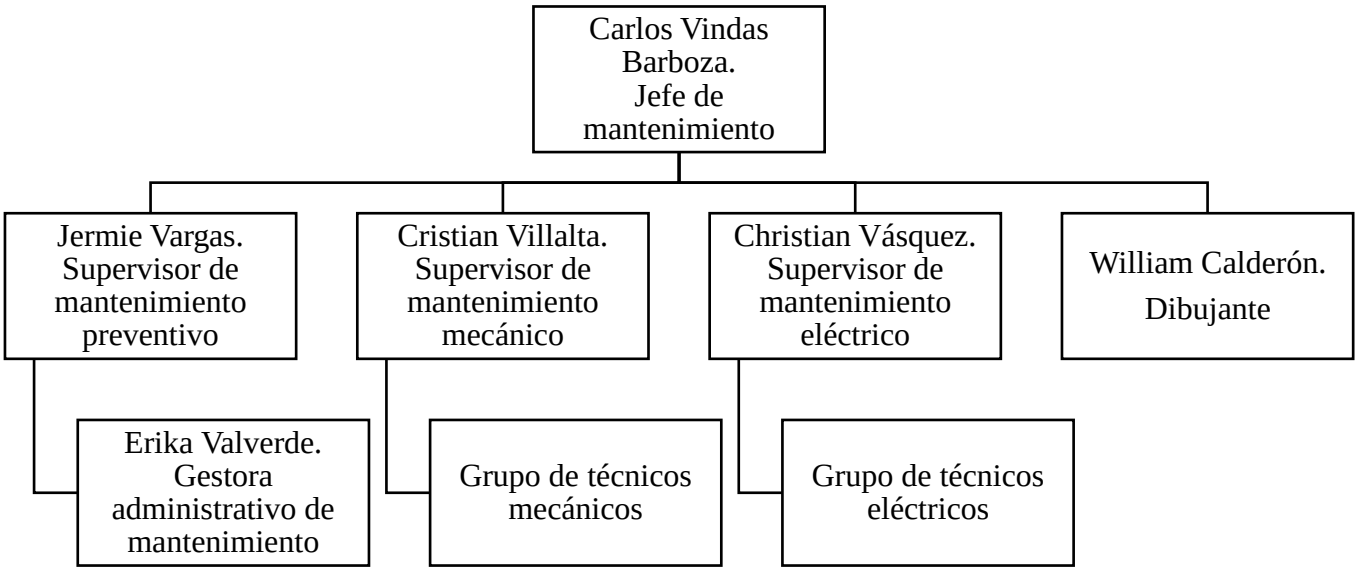
Misión.

Hacer la diferencia en el mundo de la construcción generando valor de manera sostenible para nuestros accionistas, colaboradores, clientes y comunidades.

Valores de la empresa.

- Integridad.
- Respeto.
- Compromiso.
- Descripción del proyecto.

Organigrama del departamento de mantenimiento.



4.Antecedentes.

4.1.Antecedentes teóricos.

Basado en lo explicado por Ganesh, et al., (2020) se puede decir que el mantenimiento basado en condición integra acciones técnicas, administrativas y de gestión durante el ciclo de vida de un sistema; los avances que ha realizado el mundo en la Industria 4.0 y el internet de las cosas (IoT) también ha alcanzado al mantenimiento, el uso de las nuevas tecnologías ha provocado que se haga un mejor aprovechamiento de la información que se genera continuamente en una planta industrial, el uso de sistemas de monitoreo en tiempo real permite al personal de mantenimiento realizar un diagnóstico más adecuado y también tener un mayor control de fallas. Según los autores el mantenimiento basado en la condición o CBM por sus siglas en inglés, es una estrategia de mantenimiento proactiva para activos críticos o aquellos que tienen un impacto significativo en el proceso, involucra los métodos para la evaluación continua y periódica de las condiciones del sistema, el conocimiento de la condición del sistema permite desarrollar tareas de mantenimiento que se adecuen a la realidad y se desarrollen de manera más eficiente, el mantenimiento basado en la condición es una estrategia que podría ser utilizada en una amplia variedad de técnicas, métodos y herramientas de análisis dentro de los sistemas de diagnóstico, pronostico y apoyo a la toma de decisiones.

Por otra parte, en La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe presentado por la Organización de las Naciones Unidas (2015), el objetivo de garantizar modalidades de consumo y producción sostenible, hace referencia al uso eficiente de los recursos y la eficiencia energética, además, de hacer más y mejor las cosas con menos recursos, incrementando las ganancias netas de bienestar de las actividades económicas mediante la reducción de la utilización de los recursos.

Además, el Ministerio de Ambiente y Energía (2018) de Costa Rica presenta el Plan Nacional de Energía 2015-2030 donde señala que el consumo de energía en el sector industrial se da principalmente por la generación de fuerza mediante motores eléctricos, refrigeración, aire comprimido, producción de calor, aire acondicionado e iluminación. en el eje de la senda de la eficiencia energética, las acciones de ese eje pretenden lograr una reducción más acelerada de la intensidad energética total u contribuir en la reducción de emisiones, asociadas al consumo de energía. Dentro de este eje se definieron 7 objetivos estratégicos:

- Implementar un modelo más efectivo de planificación y coordinación de la eficiencia energética.
- Incrementar la eficiencia energética de los equipos consumidores.
- Impulsar en la ciudadanía una cultura en eficiencia energética.
- Optimizar la eficiencia energética en la oferta.
- Estimular la eficiencia energética en los macro consumidores.
- Fomentar la eficiencia de consumo energético del sector público.
- Adecuar las tarifas para el fomento de la eficiencia energética.

También el Ministerio de Ambiente y Energía (2018) presenta por otra parte el Plan Nacional de Descarbonización donde se plantea el uso eficiente de los recursos para el sector industrial promoviendo las buenas prácticas en la gestión de la energía y también implementando nuevos programas de eficiencia a los equipos industriales del país, son algunas de las actividades propuestas en el eje numero 6: Modernización del sector industrial mediante la aplicación de procesos y tecnologías eléctricas, eficientes y sostenibles de baja y cero emisiones.

4.2. Antecedentes de campo.

A pesar de que el CBM puede tener influencia en diferentes sectores de una organización no siempre se considera el impacto que tienen las tareas de mantenimiento sobre la eficiencia energética de una organización y según el estudio presentado por Orošnjak, et al., (2021) indica que no tomar en cuenta indicadores de sostenibilidad como la eficiencia energética o la huella de carbono en la toma de decisiones del mantenimiento, se pueden ver como un retroceso para la evolución del mantenimiento. Además, indica que existe una influencia positiva en la toma de decisiones en relación con la energía como herramienta de supervisión del mantenimiento e indicador de sostenibilidad. Conjuntamente, se resalta en el mismo estudio que una ventaja de monitorear la energía es la capacidad de las energías para ser transformadas en valor monetario.

En el estudio sobre la Matriz Energética de Costa Rica expuesto por Zárate y Ramírez (2016) se dice que el sector industrial consume el 24% de la energía total del país solo por detrás del sector transporte, además, el sector industrial consume el 20% de la energía eléctrica del país, solo por detrás del sector residencial.

También es importante considerar lo mencionado en el estudio desarrollado por Rastegari (2017) donde se indican que el 30% del consumo de energía en la industria se desperdicia en máquinas en estado de reparación, inactividad y espera. Lo que representa un reto para las organizaciones ya que tiene un impacto financiero.

5. Planteamiento del problema.

Como se pudo apreciar en lo descrito en la sección anterior, el mantenimiento industrial podría influir en la gestión energética, sin embargo, algunas organizaciones no siempre toman en cuenta esa relación de manera directa, por lo que el no valorar el impacto de las operaciones del mantenimiento industrial sobre la gestión energética podría genera un vacío de conocimiento, ya que, se desconocería cómo afecta esto a la competitividad de una organización.

El Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica, así como la Organización de las Naciones Unidas resaltan la importancia del uso eficiente de los recursos energético en las industrias, por tanto, es importante contar con información confiable de los factores que influyen sobre esos recursos energéticos, el mantenimiento de los activos de una organización puede afectar financieramente de manera positiva o negativa a una organización, sin embargo, el no contar con información confiable podría llegar a dificultar o afectar los resultados de un análisis financiero.

Según estudios realizados en el consumo energético de Costa Rica la industria manufacturera es uno de los sectores de principal consumo energético, por tal motivo, es un sector de interés como alternativa para abordar el problema planteado en este proyecto.

TABLA 1. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA DEL PROYECTO.

		Dato suministrado	**Referencias bibliográficas**
Debiera	Existir indicadores de sostenibilidad energética a través del mantenimiento basado en la condición.	El no incorporar indicadores de sostenibilidad se puede considerar como un retroceso en la evolución del mantenimiento, además, 30% del consumo de energía en la industria se desperdicia en máquinas en estado de reparación, inactividad y espera.	Orošnjak (2021) Rastegari (2017)
Desviación	Desconocimiento del impacto en la competitividad del mantenimiento basado en la condición en el rendimiento energético en los procesos productivos de Plycem.		
		Dato suministrado (lugar)	**Referencias lugar estudio**
Realidad	No existe registro de la correlación del mantenimiento basado en la condición con la gestión energética.	No existe evidencia en la compañía Plycem de la relación del mantenimiento basado en condición en la gestión energética.	Plycem Construsistemas S. A.

6.Objetivos.

6.1.Objetivo general.

- Desarrollar un sistema de mantenimiento basado en la condición que correlacione el rendimiento energético para el proceso de fabricación de productos de fibrocemento evidenciando el eventual impacto en la competitividad en la compañía Plycem, para un sistema electromecánico basado en un análisis de criticidad.

6.2.Objetivos específicos.

- Determinar el uso de la energía de la compañía mediante la realización de un balance energético bajo los estándares de norma ISO 50002, por la línea de producción en la compañía.

  Indicador de logro: Diagramas y gráficos generados en el balance.
- Examinar el sistema electromecánico crítico identificado en el balance energético por medio de un estudio de Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad (AMFEC) para el establecimiento de los parámetros que serán considerados en el monitoreo.

  Indicador de logro: AMFEC del activo crítico.
- Desarrollar un plan piloto de monitoreo en tiempo real del consumo energético y parámetros necesarias desde la perspectiva de mantenimiento industrial para el establecimiento de la correlación del CBM y el rendimiento energético.

  Indicador de logro: Desarrollo de plan piloto del Sistema de monitoreo en tiempo real.
- Determinar el impacto financiero de la creación del prototipo de monitoreo en tiempo real hacia la rentabilidad del negocio por unidad producida.

  Indicador de logro: Informe financiero.

7. Justificación.

Basándose en el estudio presentado por Ghazali, et al., (2019) se podría considerar al mantenimiento industrial en la actualidad forma parte de las estrategias del negocio de las empresas y es parte de las practicas que añaden valor al negocio desde diversas perspectivas, además, que el mantenimiento de los activos impacta sobre la disponibilidad y fiabilidad misma del proceso productivo, según el estudio de Ghazali, et al., (2019) se señala que el mantenimiento se ha convertido en una de las actividades de apoyo más importantes en la cadena de valor de las empresas. Por su parte Rastegari (2017) señala que las maquinas en estado de reparación, inactivas y espera pueden llegar a consumir un 30% de la energía que finalmente se termina desperdiciando y señala que desde la perspectiva de la sostenibilidad el CBM permite la identificación temprana de problemas con el equipo para evitar daños al producto, generación de desechos y consumo extra de energía, además Rastegari (2017) señala que el CBM contribuye directamente a la fabricación sostenible, a reducir los costos de ciclo de vida y a evitar fallas catastróficas. De lo señalado por los autores se puede comprender mejor el impacto que puede llegar a tener el mantenimiento basado en la condición en la rentabilidad de un negocio.

Según Firdaus, et al., (2019) el término de una fábrica inteligente incluye la aplicación del internet de las cosas IoT, computación en la nube, sistemas ciber físicos, análisis de big data y tecnología de la información y comunicación, según el autor el surgimiento de estas nuevas tecnologías también afectan al gestión energética y a las estrategias y prácticas de mantenimiento, además, en este mismo artículo se señala que lo anterior conduce a una aplicación avanzada de la tecnología de monitoreo de condición, lo que podría permitir que la estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo tradicionales cambien al mantenimiento basado en la condición (CBM, por sus siglas en ingles). En el estudio de Firdaus, et al., (2019) también se menciona que a partir del monitoreo del consumo de energía casi en tiempo real se podría notar comportamiento anormal

en el patrón de consumo y esto podría llegar a indicar una falla o mal funcionamiento del equipo y menciona también que con la ayuda del análisis de datos para el mantenimiento se pueden realizar acciones de mantenimiento inmediatas y adecuadas para abordar el problema.

Es importante destacar el desarrollo del mantenimiento basado en condición, el cual según Montero et al (2020) se considera como una versión extendida del mantenimiento predictivo donde se agregan alarmas para advertir cuando el sistema ha superado los umbrales predeterminados, según lo mencionado en el estudio el mantenimiento predictivo es una estrategia que busca el momento preciso para activar las acciones de mantenimiento, además, se menciona que tiene dos principales alcances, el diagnóstico que tiene como objetivo detectar fallas, determinando su causa raíz y determinando el estado de salud actual del sistema, por otra parte, el pronóstico está dedicado a predicciones de los estados futuros del sistema y el su vida útil restante. También se explica en este artículo que el diagnóstico y pronostico puede ser realizado en línea donde los datos son recopilados, procesado y analizados en tiempo real para genera alarmas o activar acciones de mantenimiento mientras el sistema está funcionando, para el caso de las aplicaciones que no son en línea se recopilan datos para ser analizados más tarde. De lo anterior se puede comprender mejor algunas de las ventajas del mantenimiento basado en la condición, del cual es posible generar acciones de mantenimiento a partir de alarmas generadas de la evaluación de la condición de salud real del sistema analizado, lo que permite al personal de mantenimiento una gestión basada en datos de la condición real del activo.

En el estudio presentado por Montero, et al., (2020) donde se describen los principales modelos usados para el pronóstico y diagnóstico, de los cuales se identifican tres tipos de modelos el modelo basado en el conocimiento los cuales se basan en la experiencia, sin embargo, se menciona que encuentran limitaciones para los pronósticos ya que es muy difícil obtener resultados precisos. Otro modelo descrito en el estudio es el modelo basado en datos, el cual ha ganado mucha importancia en los últimos años gracias a la disponibilidad de poder computacional y la producción de grandes cantidades de datos, según lo mencionado

en el artículo los datos pueden ser utilizados para estudiar la degradación de los componentes, el estado de salud del sistema o su vida útil restante, en el artículo se presentan tres modelos basados en datos el primero es el modelo estadístico el cual se utiliza para determinar la degradación actual y la vida restante esperada, esto se realiza comparando su comportamiento actual de variables aleatorias frente al comportamiento conocidos representados por series de datos. El segundo modelo basado en datos es el modelo estocástico son modelos de probabilidad que tienen como objetivo el estudio de la evolución de variables aleatorias a lo largo del tiempo. Por último, se mencionan en la investigación de Montero, et al., (2020) los modelos de aprendizaje automático el cual es una rama de la inteligencia artificial que utiliza algoritmos de aprendizaje especializados para construir modelos a partir de datos. El otro modelo utilizado para el diagnóstico y pronostico mencionado por el autor son los modelos basados en física donde se utilizan leyes de la física para evaluar la degradación de los componentes. De lo anterior se puede entender la importancia de la recolección y análisis de los datos de los sistemas electromecánicos para poder determinar la degradación y vida útil restante de los sistemas a través del pronóstico y diagnóstico realizado por alguno de los modelos presentados por el autor.

Basado en el estudio de Zárate y Ramírez (2016) a nivel nacional el consumo energético en la industria ocupa el segundo lugar, el sector industrial costarricense está compuesto por minas y canteras, construcción y manufactura, en el sector manufacturero destaca el sector de producción alimentos que representa el mayor consumo de energía en la industria manufacturara con un 35% en promedio, también destaca el sector de otras manufactureras (incluyendo a las manufactureras de microprocesadores y productos biomédicos) que está en segunda posición con 19%., seguido por textiles, madera y químicos y finalmente papel y construcción. De lo anterior se considera que al ser el sector manufacturero un sector de alto impacto energético se convierte en un sector de interés en las prácticas de gestión de los recursos energéticos, un caso particular desarrollado en una industria de Costa Rica por Araya (2020) resalta que dentro de los controles operacionales para el modelo de gestión de energía se involucra el mantenimiento y rectificación, además, se mencionan tareas de

mantenimiento predictivo como lo son las vibraciones, termografías y alineamiento. Esto también evidencia la relación existente entre el mantenimiento y la gestión energética.

Es importante recalcar la relación y el impacto que tiene el mantenimiento sobre la gestión energética, en la guía presentada por la Agencia de Sostenibilidad Energética (2018) en Chile, se afirma que el cumplimiento de los parámetros definidos para los Usos Significativos de Energía (USEs) no depende solamente de la competencia de los operadores, sino también de la existencia de un plan de mantenimiento que apunte a reducir el efecto creciente del consumo energético a medida que la maquina se acerca a la obsolescencia, y que responda a las necesidades de los procesos productivos a lo largo del tiempo. Además, se indica que las personas encargadas del mantenimiento deben estar conscientes del impacto potencial de su trabajo sobre el desempeño energético de los USEs. Lo expuesto anteriormente muestra la importancia de conocer el impacto del mantenimiento sobre la gestión energética y como este finalmente va a repercutir económicamente en la organización.

En otro estudio se menciona la relevancia del mantenimiento de los equipos eléctricos en la eficiencia de la energía eléctrica, en el caso particular de los equipos rotativos Mercado y Peña (2016) indican que parámetros como vibraciones producen calentamiento en devanados, ejes y problemas mecánicos, que se relacionan notablemente con el consumo de energía eléctrica excesivo, asimismo, pueden ocasionar daños permanentes en los rodamientos y en las conexiones eléctricas, llegando a producir corto circuitos, aumento del consumo eléctrico mayor a 10% de la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento normal.

Como se ha mencionado, los indicadores de sostenibilidad como la eficiencia energética son útiles también para la toma de decisiones del mantenimiento industrial, investigaciones como la desarrollada por Hoang (2017), estudian la incorporación de estos indicadores en la toma de decisiones del mantenimiento basado en la condición, según el autor el consumo energético es un indicador de la condición del equipo analizado, por

lo tanto, el análisis de su comportamiento es aprovechable en el pronóstico y diagnóstico de la condición de equipo y señala que al poseer indicadores de energético es posible considerar no solo el impacto en costos de mantenimiento sino que también el impacto en los costos del consumo energético.

Algunos autores como García, et al., (2019) resaltan que dentro del mantenimiento comúnmente no consideran el impacto en la eficiencia energética, además, la incorporación de indicadores energéticos son necesarios para poder evaluar el impacto de las tareas de mantenimiento en el consumo energético, sin embargo, destaca que la falta de información o un inadecuado manejo de la misma dificulta el aprovechamiento de los modelos de mantenimiento enfocados en la eficiencia energética, esto evidencia la necesidad de contar con información en tiempo real y que esta información sea confiable para poder cuantificar la influencia del mantenimiento en la rentabilidad.

Además, cabe recalcar la importancia de desarrollar un balance energético, en el estudio de Bernal (2017) a partir de un balance de energía se puede observar los diferentes flujos energéticos en las distintas etapas de la elaboración de un producto, también se puede conocer los principales usos de energía en la empresa y el porcentaje de utilización de cada tipo de energía. Según Araya (2020) el balance energético se considera un insumo importante para la toma de decisiones, determinación de prioridades de inversión, estructura de costos y conocimiento de la forma en que se utiliza la energía en una empresa. Lo anterior según lo señalado por Bernal (2017).

Según Chacón (2016), para realizar análisis económicos se considera importante recopilar, acumular, clasificar y asignar las cifras de costos de costos a los diversos objetos del costo son fundamentales para todas las organizaciones y, en particular, para las empresas. La razón de ello consiste en que permiten la valoración de los artículos fabricados y/o los servicios prestados, además que ayuda a anticipar las consecuencias

económicas de las decisiones gerenciales. De lo anterior se puede comprender lo importante de conocer los costos asociados a un proceso productivo.

Basado en lo expuesto hasta ahora en esta sección, a partir de la revisión bibliográfica realizada se propone el desarrollo de este proyecto en una empresa del sector industrial el cual es uno de los sectores de mayor impacto energético en Costa Rica, además, según lo indicado anteriormente las maquinas en estado reparación, inactivas o espera pueden llegar a desperdiciar energía y según las investigaciones descritas anteriormente, el mantenimiento basado en condición puede aportar positivamente a la eficiencia energética, por tanto, con el desarrollo de este proyecto se trata de establecer una relación entre el mantenimiento basado en condición y el rendimiento energético para que el personal de mantenimiento posea una herramienta que pueda aportar a la toma de decisiones basadas en datos, en la evaluación de la condición de deterioro del equipo o componente pero también considerando la influencia en el rendimiento energético; por otra parte, el no realizar el proyecto podría no solventar el vacío de conocimiento entre el impacto financiero que puede tener le mantenimiento basado en condición en la facturación energética y finalmente en la competitividad del negocio. En una futura implementación de lo propuesto en este proyecto el departamento de mantenimiento sería el principal encargado del desarrollo de este, ya que sus funciones dentro de la compañía están directamente relacionadas con los conocimientos requeridos para el desarrollo de un proyecto de esta índole.

8. Viabilidad

La temática del presente proyecto requiere del uso de sensores y otros equipos que permitan la recolección y posterior almacenamiento de los datos tanto relacionados con el mantenimiento, así como con el rendimiento energético, por lo tanto, es necesario cubrir algunos requisitos desde perspectiva económica, técnica y humana, ya que es necesario valorar la situación energética y seguido de esto plantear un sistema de adquisición de datos en tiempo real y su almacenamiento en la nube.

Debido a que este proyecto utiliza herramientas tecnológicas referentes al internet de las cosas se requiere de un asesoramiento adecuado para el planteamiento y desarrollo del proyecto, para este caso, se cuenta con el apoyo de los ingenieros del área administrativa de la Escuela de Ingeniería Electromecánica del Tecnológico de Costa Rica, quienes han estudiado temas relacionados a energía, mantenimiento y tecnologías del IoT.

También, es importante mencionar que se cuenta con acceso a las bases de datos de la biblioteca del Tecnológico de Costa Rica, donde es posible encontrar información para desarrollar conocimiento y valorar estrategias para el abordaje de la problemática planteada en el proyecto.

Además de lo anterior, se debe mencionar que con respecto a los materiales en el país se cuentan con diversos proveedores donde es posible conseguir lo necesario para el desarrollo del proyecto, además, se pretende utilizar software de acceso libre para la parte de programación.

9. Alcance

Este proyecto trata de dotar a la empresa de herramientas para aportar al crecimiento de la organización, este es un proyecto de carácter exploratorio cuyo alcance se basa en relacionar el impacto financiero del mantenimiento basado en condición en el rendimiento energético, para esto desarrollar la estructura necesaria para las mediciones requeridas involucrando variables energéticas y de mantenimiento. De esta manera se busca beneficiar principalmente a la compañía y al Departamento de Mantenimiento de esta.

El desarrollo del proyecto se enfocará en las líneas de producción de láminas de fibrocemento, principalmente en el horno 2. Para el desarrollo del monitoreo de la condición el proyecto tiene como alcance el aislamiento térmico de la hornilla, otras partes del horno no son del alcance de este proyecto. El monitoreo de la condición del aislamiento es desarrollado mediante una simulación, además se consideran una estimación de los costos para un prototipo de baja inversión, sin embargo, la implementación del sistema de monitoreo a escala industrial o la implementación del prototipo con los equipos, sensores y demás componentes no es parte del alcance del este proyecto.

10. Limitaciones

En la situación actual que enfrenta el país con respecto a la pandemia por el covid-19, existe un riesgo latente del cambio en la medidas de higiene y seguridad debido a los cambios de las tendencias de los casos activos según el Ministerio de Salud (2021), que podrían llegar a afectar el desarrollo del proyecto según se había planeado, sin embargo, se espera que con el avance de la vacunación la situación se mantenga bajo control y pueda desarrollarse de manera satisfactoria, además, existe la posibilidad de desarrollar algunas tareas de manera remota si existiera la necesidad de reducir el contacto, sin embargo, no todas la tareas del proyecto pueden ser realizadas de manera remota, por tanto, existe la necesidad de cumplir con todos los protocolos para evitar complicaciones.

El proyecto propuesto tiene como temática la relación entre el mantenimiento basado en condición y el rendimiento energético, esta temática no se ha explorado en gran medida en el país, por lo que la información encontrada es en contextos de otros países, por ejemplo, lo desarrollado por Hoang (2017) y García, et al., (2019), esto representa un reto importante, ya que se parte con información escaza a nivel país, a pesar de esto si existe registro en el TEC de proyectos enfocados en el mantenimiento basado en la condición y también de modelos de gestión de energía que incorporan mediciones en tiempo real, por lo que pueden aportar información valiosa para subsanar esta limitante, además, como se mencionaba anteriormente se cuenta con el asesoramiento de los profesores del TEC.

Con respecto a la confidencialidad, según lo conversado con el asesor industrial en Plycem, no es necesario que el proyecto sea confidencial por lo que no representa una limitante.

11. Marco teórico

Energía.

La energía es un concepto ampliamente utilizado, según Salazar (2016) en física se define como la capacidad para realizar un trabajo. Por otra parte, en tecnología y economía, se refiere a un recurso natural (incluyendo a su tecnología asociada) para extraerla, transformarla y darle un uso industrial o económico. La energía no puede ser creada ni destruida, pero si es susceptible a pasar de una forma a otra y es en este proceso donde el hombre aprovecha para satisfacer sus necesidades. El autor resalta que las fuentes se les denomina recursos energéticos (petróleo, gas natural, carbón, energía nuclear, energía eléctrica, energía solar, etc.); y al conjunto de actividades industriales y comerciales que los extraen y transforman hasta colocarlos en el mercado para su utilización como energía en si misma o como combustible se le denomina como sector de energía.

Eficiencia energética.

El concepto de eficiencia energética según lo explicado por la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (2017) hace referencia a reducir la cantidad de energía (eléctrica y combustible) que se utiliza para generar un bien o un servicio, sin afectar la calidad de los productos, el confort de los usuarios ni la seguridad de las personas y bienes. El uso de menor energía se asocia con la incorporación de nuevas tecnologías (Por sustitución de equipos o por optimización del proceso) y con acciones relacionadas a la gestión de la energía, en cualquiera de los casos, se considera la contribución de la eficiencia energética en el aumento de la competitividad de las empresas, disminuyendo los costos energéticos a corto plazo y largo plazo.

Para Bravo y Martínez (2016) el objetivo estratégico de todo empresario es mantener una relación de mayor calidad y menor precio, o en el caso de precios fijados por un mercado globalizado, mantener una alta calidad con los menores costos posibles, para aumentar las utilidades. Un programa de aumento de la

eficiencia energética reduce los costos, permite disminuir el precio o aumentar las utilidades, asegurando la calidad y mejorando la competitividad de la empresa.

Desempeño energético.

El concepto de desempeño energético para Ruiz (2020) corresponde a un concepto más amplio que integra además de la eficiencia energética, el uso de energía y el consumo de energía, es decir, el desempeño energético está relacionado con los tipos y formas de energías, los equipos o procesos que la utilizan y la eficiencia en su uso.

Balance energético.

La norma ISO 50002:2014 (2014) describe que el balance energético es la cuantificación de entradas y/o generación del suministro de energía frente a las salidas de energía, basadas en el consumo de energía por el uso de la energía, tomando en consideración:

Nota 1 a la entrada: El almacenamiento de energía es considerado dentro del suministro o uso de la energía. Si se incluye dentro del alcance de la auditoría energética es necesario que el balance energético incluya el almacenamiento de la energía y la variación de las materias primas, así como las pérdidas de energía o la energía contenida en los flujos de materiales.

Nota 2 a la entrada: Un balance energético compara toda la energía, bienes y productos que entran en el límite del sistema, frente a la energía, bienes y productos que salen del límite del sistema.

Gas Licuado de petróleo.

El gas licuado de petróleo (GLP) es explicado detalladamente por Vásquez (2006) como una mezcla compuesta principalmente por propano (C_3H_8) y butano (C_4H_{10}), que, sometida a moderadas presiones y temperaturas de ambiente, alcanza el estado líquido, el cual facilita su manipulación y transporte, el GLP se

obtiene de la destilación del crudo. La combustión del GLP tiene múltiples usos entre los que destacan la generación de calor por medio de cocinas y calentadores de agua a nivel residencial, comercial e industrial, para los vehículos automotores duales en el sector transporte, así como la generación de calor en calderos y hornos a nivel industrial. En este último segmento, el GLP se utiliza en procesos donde se requiere alta temperatura y calidad de combustión para evitar la contaminación de los productos finales tratados en hornos y secadores. En relación con las emisiones, la combustión del GLP genera como residuo dióxido de carbono (CO2) y vapor de agua (H2O). La formación de hollín y gases no combustionados como hidrocarburos libres, hidrógeno, etc., resulta ser prácticamente despreciable. Por otro lado, la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x) está esencialmente ligada a los niveles de aire y temperatura de la flama.

Energía eléctrica.

Según López (2002) la energía eléctrica se obtiene por procesos basados en el principio de Faraday quien intuyo que los campos magnéticos podían producir electricidad. La producción de electricidad puede darse por varias fuentes como la biomasa, eólica, fotovoltaica, hidroeléctrica, nuclear, combustibles fósiles, entre otros. Utilizada a nivel residencial, transporte e industria, en esta última como fuente impulsora de motores eléctricos de la máquina y sus componentes propios, para el calentamiento, iluminación y climatización.

Diésel.

La Refinadora Costarricense de Petróleo Recope (2016) describe que el diésel es una mezcla de hidrocarburos que se obtiene de la destilación fraccionada del petróleo a una temperatura entre 250°C y 350°C a presión atmosférica. Es más sencillo de refinar que la Gasolina y tiene mayores cantidades de componentes minerales y de azufre. Además, contiene un 18% más de energía por unidad de volumen que la Gasolina, lo que, sumado a la mayor eficiencia de los motores Diesel, contribuye a que su rendimiento sea mayor. Las

propiedades del combustible, tales como temperatura de ignición, volatilidad, estabilidad a la oxidación, potencia, formación de depósitos y emisión de gases, dependen directamente de la composición del mismo.

Indicadores de sostenibilidad o desempeño energético.

Según la norma INTE/ISO 50001 (2018), un indicador de desempeño energético es una "regla" que se utiliza para comparar el desempeño energético antes y después de la implementación de planes de acción y de otras acciones. Los indicadores energéticos pueden estar ligados a la producción como lo indica Zúñiga (2014) y afirma que un aspecto muy importante para el desempeño de la empresa es la cuantificación de la energía relacionándolo con la producción, donde propone establecer como indicador litros de GLP por unidades producidas.

Principio de Pareto.

Según lo descrito por Rodríguez (2017) el principio de Pareto establece que hay muchos problemas sin importancia frente a solo unos graves y generalmente el 80% de los resultados totales se originan en el 20% de los elementos. De este principio se deduce el diagrama de Pareto que constituye un método de análisis que permite separar entre las causas más importantes de un problema (pocos y vitales) y las causas que no son tan importantes (muchos y triviales). También se enumeran algunas de las ventajas más importantes del diagrama de Pareto, entre ellas:

- Permite centrarse en los aspectos cuya mejora tendrá más impacto, optimizando por tanto los esfuerzos.
- Proporciona una visión simple y rápida de la importancia relativa de los problemas.
- Ayuda a evitar que se empeoren algunas causas al tratar de solucionar otras y ser resueltas.
- Su visión gráfica del análisis es fácil de comprender y estimula al equipo para continuar con la mejora.

Mantenimiento Industrial.

Según García (2010) el mantenimiento industrial se puede definir como el conjunto de técnicas destinado a conservar equipos e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible (buscando la más alta disponibilidad) y con el máximo rendimiento.

Se pueden encontrar algunos tipos de mantenimiento, Cárcel, et al., (2016) describe que entre los más tradicionales están:

- Mantenimiento correctivo: Este tipo de mantenimiento consiste en la restitución, mediante reparación, de los equipos a la condición requerida de utilización, cuando la avería ya se ha producido o el funcionamiento de la maquina se aleja del nivel aceptable o requerido.
- Mantenimiento preventivo: Se basa en la prevención del fallo mediante la programación de visitas periódicas (según períodos fijos de tiempo o número de operaciones) en las que se realizan verificaciones y comprobaciones del estado de los componentes del equipo. Las tareas de mantenimiento se realizan basándose en datos históricos.
- Mantenimiento predictivo: Se basa en el conocimiento del estado del componente por medición periódica o continua de algún parámetro significativo de la condición, pretende la detección precoz de los síntomas de avería y la estimación de vida residual del componente.

E-maintenance:

Este concepto del E-maintenance según Teay y Albarbar (2017) se relaciona con una visión a futuro de este, donde se integra la estrategia del mantenimiento basado en condición (CBM) con la tecnología moderna (Internet, microprocesador, transductor inteligente y red de sensores inalámbricos) y la gestión empresarial. Se cree que al fusionar el E-maintenance con E-manufacturing y E-business, es una tendencia importante en

las industrias del futuro, que beneficia a los proveedores y a los consumidores por el aumento de la fiabilidad de los equipos y los procesos.

Como se ha mencionado anteriormente basado en lo descrito por Ganesh, et al., (2020) y por Parpala y Iacob (2017). el mantenimiento basado en condición es una nueva generación del mantenimiento que evalúa la condición real del equipo a partir el monitoreo continuo de los parámetros involucrados en su funcionamiento, permitiendo un mantenimiento más efectivo y estratégico, utilizando la tecnología se puede lograr el monitoreo constante de los equipos para la correcta evaluación del estado del activo.

Modos de falla y efectos.

Según Guerra (2016) el análisis de modos de falla es una técnica de prevención, utilizada para detectar por anticipado los posibles modos de falla, con el fin de establecer los controles adecuados que eviten la ocurrencia de defectos. Los objetivos para esto son:

- Identificar los modos de falla potenciales, y calificar la severidad de su efecto.
- Evaluar objetivamente la ocurrencia de causas y la habilidad de los controles para detectar la causa cuando ocurre.
- Clasifica el orden potencial de deficiencias de producto y proceso.
- Se enfoca hacia la prevención y eliminación de problemas del producto y proceso.

Guerra (2016) propone un procedimiento para elaborar un análisis de modos de falla:

- Modo de falla es la manera en que podría presentarse una falla o defecto, para poder determinar se debe cuestionar ¿De qué forma podría fallar la parte o proceso (roto, flojo, fracturado, fugas, etc.)
- Efecto es cuando el modo de falla no se previene no corrige, el cliente o consumidos finales ´pueden verse afectados. (Deterioro prematuro, ruidoso, operación errática, paros de líneas, etc.).

- Causa es una deficiencia que se genera en el modo de falla, son fuentes de variabilidad asociadas con variables de entrada relacionadas con el diseño. (Ambiente, vibración, fatiga, corrosión, etc.).
- Grado de severidad para estimar esto, se debe de tomar en cuenta el efecto de la falla en el cliente. Se utiliza una escala del 1 al 10, donde 1 es una consecuencia sin efecto y 10 indica una consecuencia grave.
- Grado de ocurrencia, Es necesario estimar el grado de ocurrencia de la causa de la falla potencial. Se utiliza una escala de evaluación del 1 al 10. El "1" indica remota probabilidad de ocurrencia, el "10" indica muy alta probabilidad de ocurrencia.
- Grado de detección donde se estimará la probabilidad de que el modo de falla potencial sea detectado antes de que llegue al cliente. El '1' indicará alta probabilidad de que la falla se pueda detectar. El '10' indica que es improbable ser detectada.
- Numero de prioridad de riesgo Es un valor que establece una jerarquización de los problemas a través de la multiplicación del grado de ocurrencia, severidad y detección, éste provee la prioridad con la que debe de atacarse cada modo de falla, identificando ítems críticos.

Análisis de criticidad.

Basado en lo explicado por García (2010) los equipos dentro de una planta pueden ser clasificados según su importancia o criticidad, ya que, no todos los equipos tienen la misma importancia y por este motivo se debe ser cuidadoso cuando se destinan los recursos para el mantenimiento puesto que los equipos más críticos ameritaran mayor cantidad recurso mientras que solo una porción pequeña se debe destinar a los menos críticos. Cuando se trata de diferenciar entre los equipos más o menos críticos se empieza a realizar un análisis de criticidad de los equipos de la planta, se establecen tres niveles:

- Equipos críticos: son aquellos equipos cuya parada o mal funcionamiento afecta significativamente a los resultados de la empresa.
- Equipo importante: son aquellos cuya parada, avería o mal funcionamiento afecta a la empresa, pero las consecuencias son asumibles.
- Equipos prescindibles: Son aquellos con una incidencia escasa en los resultados, como mucho, supondrán una pequeña incomodidad, algún pequeño cambio de escasa trascendencia o un pequeño coste adicional.

Además, García (2010). Menciona que para poder clasificar cada uno de los equipos en alguna de las anteriores categorías, se puede considerar la influencia que una anomalía tiene en los siguientes cuatro aspectos: producción, calidad, mantenimiento y seguridad.

Norma IEC 60812-2018.

La norma IEC 60812-2018 (2018) cómo se planifica, realiza, documenta y mantiene el análisis de modos y efectos de falla (AMFE), incluida la variante de análisis de modos, efectos y criticidad de falla (AMFEC). Este documento es aplicable a hardware, software, procesos, incluida la acción humana, y sus interfaces, en cualquier combinación. El AMFE se puede llevar a cabo varias veces en el tiempo de vida para el mismo artículo o proceso. Se puede realizar un análisis preliminar durante las primeras etapas de diseño y planificación, seguido de un análisis más detallado cuando se disponga de más información. AMFE puede incluir controles existentes, o tratamientos recomendados, para reducir la probabilidad o los efectos de un modo de falla. En el caso de un análisis de circuito cerrado, AMFE permite evaluar la efectividad de cualquier tratamiento. Los modos de falla se pueden priorizar según su importancia. La priorización puede basarse únicamente en una clasificación de la gravedad, o puede combinarse con otras medidas de importancia.

Cuando se priorizan los modos de falla, el proceso se denomina análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC).

La norma también menciona que brinda una guía general sobre cómo planificar, realizar, documentar y mantener un FMEA mediante:

- describir los principios;
- proporcionar los pasos en el análisis;
- dar ejemplos de la documentación;
- proporcionar aplicaciones de ejemplo.

Aislamiento térmico.

Según la Fundación Laboral de la Construcción (2016) "un producto aislante térmico es un producto que reduce la transmisión de calor a través de la estructura sobre la que, o en la que se instala". Para Cabrera y Baca (2016) los aislamientos térmicos son materiales o combinaciones de éstos que se usan para suministrar resistencia al flujo de calor. La mayor parte de ellos son materiales heterogéneos, los cuales tienen baja conductividad térmica y contienen bolsas de aire. Esto no es sorprendente, ya que el aire tiene una de las conductividades térmicas más bajas y se dispone de él con facilidad, además, los autores mencionan que la fuerza impulsora para el flujo de calor es la diferencia de temperatura y entre más grande sea, mayor será la velocidad de transferencia de calor. Los aislamientos térmicos actúan como barreras que retardan el flujo de calor entre dos medios a diferente temperatura poseen una conductividad térmica baja debido a que contienen cámaras llenas de gas, fase que posee baja conductividad térmica en comparación con la fase líquida o gas de materia, por ende, no favorecen la transferencia de calor por conducción.

Cabrera y Baca (2016) mencionan algunas de las principales aplicaciones del aislamiento térmico para la industria, las cuales son:

- Conservación de la energía: Conservar la energía mediante la reducción de la velocidad del flujo de calor es la razón principal de las superficies aisladoras. Se dispone con amplitud de materiales para aislamiento que se comportan de manera satisfactoria en el rango de temperaturas de -200 °C hasta 1500 °C. El aislamiento térmico reduce las pérdidas energéticas, de tal modo que éstas pueden llegar a ser un 2-3% de las pérdidas energéticas sin aislamiento.
- Protección y comodidad personal: Si no existe aislamiento térmico suficiente, las temperaturas superficiales externas pueden ser elevadas y provocar lesiones y accidentes en las personas. En el límite, producir efectos de combustión e incendio en materiales combustibles próximos a estas superficies. Asimismo, el calor excesivo que emana de las superficies calientes crea un medio desagradable para trabajar, lo cual afecta de manera adversa el rendimiento o la productividad de los trabajadores.
- Mantenimiento de la temperatura del proceso: En la industria química algunos procesos son sensibles a la temperatura y es necesario aislar los tanques en los que se llevan a cabo, así como las tuberías de flujo, con el fin de mantener la misma temperatura en toda su extensión.
- Prevención de la corrosión y la condensación: El vapor de agua que existe en el aire se condensa sobre las superficies exteriores de los tanques o tubos cuando su temperatura cae por debajo del punto de rocío, a menos de que cuenten con un aislamiento adecuado.
- Protección contra la congelación: La exposición prolongada a temperaturas inferiores a la de congelación puede causar que el agua que se encuentra en la tubería o recipientes de almacenamiento se congele, como resultado de la transferencia de calor del agua hacia el ambiente frío, causando que éstos se revienten. El aislamiento adecuado reducirá la pérdida de calor del agua e impedirá la congelación.

- Reducción del ruido y la vibración: Un beneficio adicional del aislamiento térmico es su capacidad para amortiguar el ruido y las vibraciones.

Cabrera y Baca (2016) describen los principales tipos de aislantes térmicos:

- Materias minerales fibrosas o celulares, como el vidrio, la sílice, las rocas, las escorias o el asbesto (ya en desuso).
- Materiales orgánicos fibrosos o celulares, como la caña, el algodón, el caucho, la madera, la corteza de árbol y el corcho.
- Plásticos orgánicos celulares, como el poliestireno o poliuretano.
- Materiales que reflejan el calor (que deben dar a espacios vacíos o llenos de aire o gas).

Calor.

Según Alomá y Malaver (2007) se puede establecer una definición del calor como "una transferencia de energía térmica [debido a una transferencia de temperatura] entre dos sistemas siendo el calentamiento cuando hay adición de energía y el enfriamiento cuando hay una disminución de energía". Además, Çengel y Ghajar (2011) mencionan que la ciencia que trata de la determinación de las razones de esa transferencia es la transferencia de calor y que un equipo de transferencia de calor (como los intercambiadores de calor, las calderas, los condensadores, los radiadores, los calentadores, los hornos, los refrigeradores y los colectores solares) está diseñado tomando en cuenta el análisis de la transferencia de calor.

Primera ley de la termodinámica.

Para Çengel y Ghajar (2011) "la primera ley de la termo dinámica también es conocida como principio de conservación de la energía, expresa que, en el curso de un proceso, la energía no se puede crear ni destruir; sólo puede cambiar las formas".

Además, Çengel y Ghajar (2011) mencionan que el principio de conservación de la energía (o balance de energía) para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso se puede expresar como sigue: El cambio neto (aumento o disminución) en la energía total de un sistema en el curso de un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale en el desarrollo de ese proceso.

Transferencia de calor conducción y conductividad térmica.

Según Çengel y Ghajar (2011) la conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres. La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él.

Otro concepto importante que Çengel y Ghajar (2011) definen es la conductividad térmica la cual se describe como la medida de la capacidad de un material para conducir calor. Según los autores un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor y un valor bajo indica que es un mal conductor o que es un aislante.

Convección.

Según lo descrito por Çengel y Ghajar (2011) la convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Según los autores existen dos tipos la convección forzada si un

fluido es forzado a fluir mediante medio externo y la convección natural o libre si el movimiento del fluido es causado por las diferencias de densidad por variación de la temperatura.

Radiación.

La radiación es definida por Çengel y Ghajar (2011) como la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas.

Otro concepto relacionado con la radiación es la emisividad que según Çengel y Ghajar (2011) esta es una medida de que tan próxima está una superficie de ser un cuerpo negro. Los cuerpos negros son superficies idealizadas que emiten radiación a la razón máxima.

IoT y orientación hacia Industria 4.0.

La industria se ha transformado mucho a lo largo de la historia y en la actualidad con el surgimiento de nuevas tecnologías lo ha impulsado aún más, por ejemplo, una de las principales es el concepto de internet de las cosas, que según Parpala y Iacob (2017) puede describirse como la conectividad inteligente de dispositivos inteligentes mediante la cual los objetos pueden percibirse unos a otros y comunicarse, cambiando así cómo, dónde, y por quién se toman las decisiones, el concepto ha estado evolucionando a lo largo del tiempo y actualmente es incorporado en los sistemas de fabricación moderno, para el caso del mantenimiento industrial, la recopilación de datos de uso de diferentes equipos de producción mediante una plataforma de IoT es el principal paso para construir un sistema general de mantenimiento predictivo basado en la nube, permitiendo de esta manera simplificar el mantenimiento en una empresa..

Como se mencionó anteriormente el IoT para la recolección de los datos es uno los principales pasos para aspirar a sistemas inteligentes de la cuarta revolución industrial este concepto denominado por Rozo (2020)

como la era de la digitalización o industria 4.0. La cuarta revolución industrial fusiona los sistemas físicos, los sistemas digitales y los sistemas biológicos, para generar una red de producción inteligente donde los distintos componentes interaccionan y colaboran entre sí, lo cual modifica trascendentalmente la forma en que se observa e interrelaciona la persona con el mundo. De lo anterior se puede comprender la importancia de incorporar estos conceptos a la industria, sin embargo, es fundamental empezar a dar los primeros pasos con sistemas de recolección de datos de manera inteligente apoyado en el IoT.

La tecnología del internet de las cosas ha sido aplicada en diversos campos de la industria, incluyendo el sector energético, por ejemplo, Tao et al (2016) ha aplicado en el monitoreo del consumo de energía para la recopilación de datos del consumo energético en tiempo real, esto permite monitorearlo la energía de los objetos de manera satisfactoria durante cada etapa de su ciclo de vida.

Sistema de adquisición de datos.

Según Di Paolo Emilio (2013) los sistemas de adquisición de datos toman las señales de muestreo que miden las condiciones físicas del mundo real y las convierten en valores digitales que pueden ser manejados por una computadora. Entre los elementos básicos de un sistema de adquisición de datos están; Sensores y transductores, cableado, acondicionamiento de la señal, hardware y software del sistema de adquisición de datos y finalmente una computara.

LabVIEW.

En la página web oficial de National Instrument (2022) se describe el software LabVIEW como entorno de programación gráfica que los ingenieros utilizan para desarrollar sistemas pruebas automatizadas de investigación, validación y producción. Además, en la página web se describe que LabVIEW ha sido la herramienta elegida por los ingenieros para desarrollar sistemas de pruebas automatizadas. Desde realizar una simple medida de voltaje hasta misiones espaciales.

12. Metodología.

La metodología de este proyecto se encuentra en la tabla A1 en la sección de anexos al final del documento.

13. Plan de trabajo.

El plan de trabajo del proyecto se puede observar en la tabla A2 en la sección de anexos.

14. Análisis energético y balance de energía

En este apartado se desarrolla la revisión energética realizada en Plycem Construsistemas S.A., donde se consideran tres fuentes principales de energía el GLP, electricidad y Diesel, la empresa se ha certificado bajo el estándar ISO 50001:2018, por lo tanto, ya cuenta con un desglose bien estructurado de los respectivos consumos de energía.

Originalmente se planteó determinar los usos de energía mediante un balance energético como primer objetivo específico para este proyecto, sin embargo, como Plycem Construsistemas S.A., se certificó bajo los estándares de la norma ISO 50001:2018 el año 2021, entonces se toma como base el balance energético que dispone la empresa para el análisis requerido en este primer objetivo específico y finalmente poder definir el sistema electromecánico de interés para los demás objetivos del proyecto.

14.1. Reconocimiento de la empresa y equipos.

Antes de poder analizar la información referente a la parte energética, es importante tener claro uso que se le da a las diferentes fuentes de energía en el proceso productivo, por este motivo se realiza una identificación y descripción de las diferentes áreas de la planta, para poder relacionar este proceso con la información disponible.

Plycem se dedica principalmente a la fabricación de productos de fibrocemento, que se elaboran pasando por las etapas de: preparación de materia prima, formación de láminas, fraguado, horneado, corte y moldeo y empaque. Además, Plycem se dedica a la producción de otros productos como tanques de plástico, framecad y dentro de poco, la nueva línea de producción de miconcreto.

Este proyecto se enfocará en el área de fabricación de productos de fibrocemento, principalmente en la zona de horneado de las láminas, la razón del porque se escoge esta zona se detalla más adelante. Las áreas

de rotomoldeo, framecad y miconcreto no serán descritas tan detalladamente porque no son parte del alcance de este proyecto.

Por lo tanto, se detallará el proceso de producción de fibrocemento, esto con la intención de poder relacionar la función de los subprocesos y los nombres de las maquinas con el posterior análisis del consumo energético de la planta.

Zona de fibras: Es donde se prepara la celulosa la cual es la mezcla base para la fabricación de las láminas, el proceso inicia cargando pacas de cartón a la primera banda transportadora, para esto se utiliza un montacargas que utiliza como combustible GLP, una vez cargada la banda se transporta el cartón hacia el Pulper, por cada carga se agregan paca y media de cartón lo que equivale aproximadamente a 1200kg. En el Pulper además del cartón se agrega sulfato de aluminio y agua; el agua agregada es de dos fuentes: agua potable y agua recirculada del proceso; El Pulper se encarga de triturar el cartón y mezclarlo con los demás componentes, esta mezcla se impulsa con una bomba a través de un tubo PVC hacia la Tina #1, esta Tina, al igual que todas las demás, es un tanque que cuenta con un agitador para mantener el buen estado de la mezcla. Posterior a esto, se bombea la mezcla hacia las Tina #2, ya sea directamente por la tubería que conecta ambos tanques o por medio de los Defleacker que pueden alimentar tanto a la Tina #2 como a la Tina #3, los Defleackers son desfibradores cuya función es producir una mezcla mucho más fina. La mezcla de estas dos últimas tinas se bombea hacia las Tinas de mayor capacidad, la Tina #5 de 80 m^3 y la Tina #4 de 50m^3. Finalmente, la celulosa de estas dos tinas se bombea hacia las máquinas de placas #1 y #2. En la figura 1 se puede apreciar un diagrama de flujo para el proceso descrito.

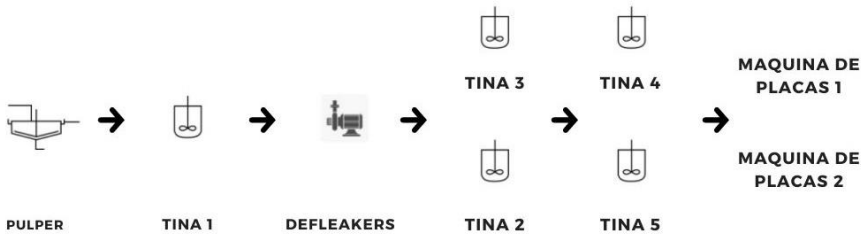


Figura 1. Diagrama de flujo para Zona de Fibras. Fuente: elaboración propia.

Zona de producción primaria: En esta parte del proceso se tienen dos máquinas de placas las cuales se encargan de la formación de láminas, estas dos máquinas son semejantes y por este motivo se explicará el funcionamiento de una de ellas. En la figura 2 se puede observar un diagrama de flujo de las primeras etapas de este proceso. En esta etapa se agregan otros componentes a la mezcla, además de la celulosa mencionada anteriormente, en primer lugar, se cuenta con cuatro silos, el primer silo es para el cemento, otro es para la caliza y otros dos que son llenados por las tuberías provenientes del molino recupero. Estos 4 silos utilizan un tornillo sin fin para alimentar la Tolva de Pesado y cargar el IMI el cual es un tanque que se encarga de mezclar todo lo proveniente de los silos con agua proveniente del cono 1.

Cabe mencionar que el molino de recupero se encarga de machacar todos los desechos de la zona de producción secundaria para poder ser reutilizado en la fabricación de las láminas, para esto se utiliza un motor eléctrico que mueve hace girar unas masas que machacan los desperdicios de láminas.

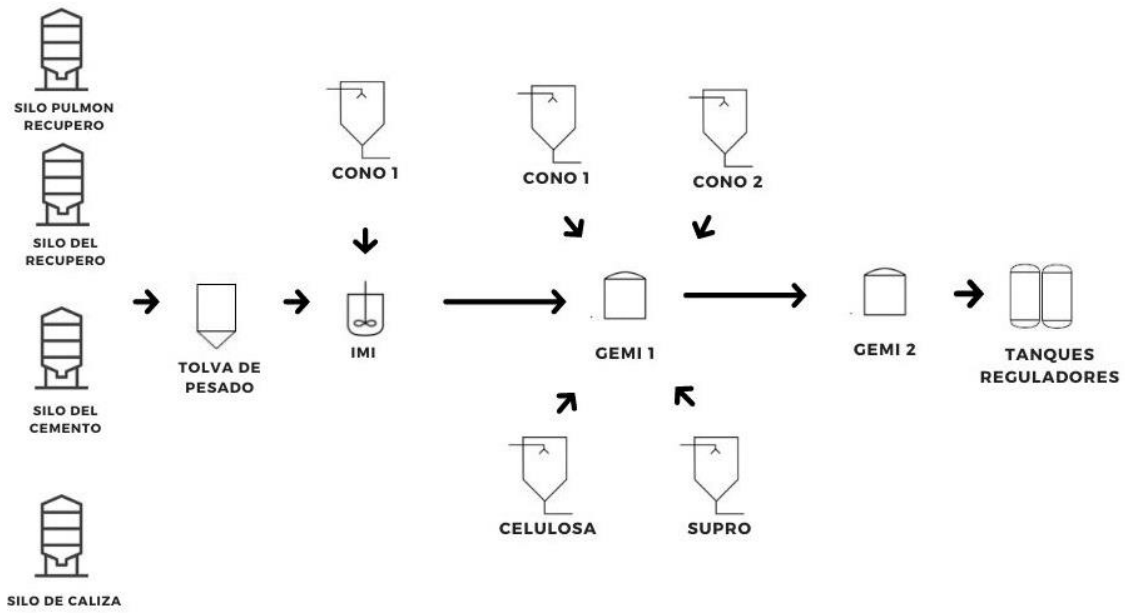


Figura 2. Diagrama de flujo primera etapa de producción primaria. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 2, la mezcla del IMI se transporta con una bomba hasta el GEMI #1 y en este tanque se combina la mezcla del IMI con el agua del cono #1 y cono #2, material recuperado por el Supro, así como la celulosa proveniente de la Zona de Fibras. Posterior a esto se bombea la mezcla hasta el GEMI #2, posteriormente se bombea la mezcla hasta los tanques reguladores, que se encargan de mantener la cantidad necesaria de mezcla para la maquina formadora.

Es importante aclarar, la función del cono #1 y cono #2, estos conos contienen agua recuperada del proceso para volver a ser utilizada en el mismo. El agua es bombeada hasta el cono #1 y por gravedad se alimentan tanto el Kroenemberg y el cono #2. Cada uno de estos cuenta con un motor eléctrico para accionar el removedor. El Kroenemberg envía agua hacia el Pulper en la zona de fibras o bien, se puede enviar el agua hacia el tanque de almacenaje, posteriormente pasa al tanque del disolvente, luego se bombea hasta el tanque

de lodos y finalmente se bombea hasta el Supro y como mencionó anteriormente esta agua se vuelve a reincorporar al proceso en el GEMI #1.

Continuando con la siguiente etapa del proceso, en la figura 3 se muestra un diagrama de flujo para el proceso final de la Zona de producción primaria, una vez que la mezcla sale de los tanques reguladores se bombea para entra en el homogeneizador donde se prepara la mezcla en las proporciones requeridas y se vierte sobre el fieltro de la banda, estos equipos son accionados por motores eléctricos. Mientras la mezcla es transportada a lo largo de la banda, 4 bombas de vacío se encargan de extraer humedad a la mezcla, el agua extraída se arroja a un caño que la transporta hasta la bomba de sala y esta se encarga de elevar el agua hasta el cono 1, que como se mencionó anteriormente, se reutiliza en el proceso.

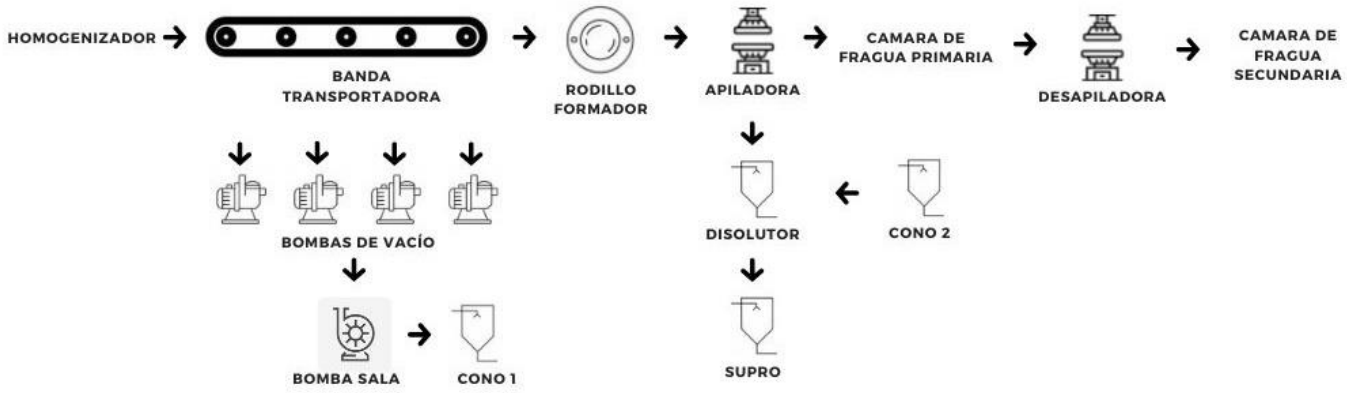


Figura 3. Diagrama de flujo segunda etapa de producción primaria. Fuente: elaboración propia.

Cuando la lámina llega al final de la banda se adhiere al rodillo formador, para generar varias capas y aumentar el espesor de la lámina según lo requerido, esto a una razón de 1 milímetro por vuelta aproximadamente.

Posteriormente, la lámina entra a la apiladora, donde se corta la lámina a las dimensiones demandadas por la producción, los desechos de los recortes se llevan por una banda transportadora hasta el disolutor. Una vez

cortada la lámina se procede a sacarlas de la banda y apilarlas en el carro de transporte, este proceso se realiza con ventosas de vacío que toman la lámina y luego la coloca en el carro de transporte, esta máquina apiladora realiza movimientos tanto verticales como horizontales. Cabe aclarar que se cuentan con dos grupos de ventosas, uno encargado de transportar láminas y otro encargado trasportar separadores (laminas metálicas lisas), entonces cada vez que coloca una lámina de fibrocemento en el carro de transporte, el otro grupo de ventosas toma un separador que luego se colocará encima de la lámina de fibrocemento recién colocada y así se separa de la siguiente lamina que se apile, los separadores se toman de un carro que llega a través del carril de retorno. Una vez que se llena el carro este se transporta con un motor eléctrico hacia el curado primario y el carro que contenía a los separadores, como ya se encontraría vacío, se traslada a la posición de carga de las láminas de fibrocemento y otro carro con separadores toma su posición anterior, este movimiento se realiza con un transferidor el cual se encarga de mover los carros del carril de retorno al carril de carga, en todo este proceso se utilizan motores eléctricos.

Es importante aclarar, que los desechos que entran al disolutor se mezclan con agua proveniente del cono 2 y luego se bombea la mezcla hasta el Supro para que sea reincorporada al proceso productivo.

Las láminas en los carros de transporte entran en el curado o fragua primarios donde se rocía vapor dentro de las cámaras de fragua correspondiente para cada máquina de placas. En la salida de la fragua se encuentra otra maquina des apiladora la cual se encarga de descargar el carro lleno de láminas y separadores, esta máquina cumple el mismo funcionamiento que la maquina apiladora descrita anteriormente con la diferenciade que esta última apila las láminas en tarimas para que posteriormente un montacargas las pueda trasportar, por otra parte los separadores son apilados en un carro vacío en el carril de retorno, cabe mencionar que en este caso se cuenta con aspersores de diésel para lubricar los separadores y evitar que se adhieran entre ellos. Finalmente, las tarimas son llevadas a la fragua secundaria con un montacargas, esta fragua es un recinto cerrado dotado de aspersores de vapor donde se almacenan las láminas.

Zona de producción secundaria: Una vez las láminas cumplen con el tiempo de fragua, son transportadas por montacargas hasta el conveyor de carga de alguno de los hornos, la escogencia del horno dependerá de las dimensiones de la lámina, espesor y demanda de producción, pero generalmente en el horno 1 y horno 3 se procesan láminas de mayor tamaño y mayor espesor por encima de 17 milímetros, mientras que en el horno 2 generalmente se procesan las láminas de menor tamaño y con espesores por debajo de 17 milímetros.

Se detallará con mayor cuidado el funcionamiento del horno, ya que es de vital interés para este proyecto. En primera instancia la tarima con las láminas es trasporta por el conveyor hasta la posición requerida por el robot de carga. Una vez ubicada la tarima en la posición necesaria, entran en funcionamiento los dos robots, el primer brazo robótico posee una herramienta de cuatro a seis ventosas de vacío que se encargan de sujetar las láminas para moverlas desde la tarima hasta la canasta de carga del horno, el vacío de estas ventosas es generado por bombas neumáticas y se sujetan a una estructura metálica adaptada al brazo robótico. El otro robot se encarga de colocar separadores (estructura de tubos metálicos) en la canasta esto permite dejar un espacio vacío entre las láminas y facilitar el flujo de aire caliente durante el proceso de secado, los separadores son tomados por el robot de una canasta proveniente del carril de retorno; la herramienta de este robot puede ser de ventosas igual que la utilizada para las láminas o puede ser una herramienta con imanes, que cuenta con un sensor que activa los electroimanes al detectar el separador y lo sujeta, actualmente solo en el horno 2 existen robot de imanes en la carga y descarga, en el caso del horno 1 y horno 3 se han cambiado por ventosas. Los robots pueden ser controlados en automático o también el operador puede hacerlo manualmente utilizando el KSD el cual es un mando con una pantalla donde manipula el movimiento del robot.

Las láminas son colocadas de manera vertical en la canasta, lo que significa que la cara donde se mide el espesor está paralela con el suelo, mientras que las caras anchas de la lámina se ubican perpendicular al suelo, al estar las láminas en esta posición existe el riesgo que puedan caerse, para evitar esto se mantienen dos turbinas de aire impulsando aire hacia las caras de la lámina y así evitando que puedan caerse. Una vez que

la canasta esté llena las láminas no se pueden caer porque los separadores quedan ajustados en la canasta y no permiten que se muevan.

Durante este proceso de carga es importante que la canasta este alineada para que las láminas se acomoden ordenadamente, para esto se utilizan pistones neumáticos que empujan a la canasta y la mantienen fija y alineada en la posición necesaria. Una vez que la canasta está llena un pistón hidráulico empuja la canasta hacia la entrada el horno, en este punto no necesariamente la canasta entre en el horno directamente, algunas veces, la canasta queda en esa posición de espera hasta que se cumplen los tiempos de secado necesarios para las láminas que están dentro del horno. En este punto se procede a cargar otra canasta, para esto el transferidor se encarga de transportar la canasta vacía que antes tenía los separadores a la posición de carga, una vez en este punto la canasta se eleva con el levitador el cual utilizando dos pistones hidráulicos y de esta manera el transferidor puede desplazarse nuevamente hasta el carril de retorno para tomar la canasta con separadores y trasladarla a la posición requerida por el robot, el transferidor cuenta con un motor eléctrico y se desplaza con una cadena y piñón.

Una vez que se ha cumplido el tiempo de secado para las láminas que están dentro del horno, entonces se abre la puerta del horno, esto se realiza con un motor y un cable de acero, cuando la puerta se abre entonces la canasta es empujada dentro del horno por el Voller, el cual es un pistón hidráulico con un empujador que empuja la canasta y en consecuencia esta canasta entra en contacto con el resto de canastas que están dentro del horno y las desplaza.

Cuando las canastas entran en el horno pasarán por tres etapas denominadas: pre - secado, secado y post - secado, en cada una de estas etapas se mide la temperatura interna y la humedad del horno. El calentamiento del aire se realiza en la hornilla, la cual es una recinto ubicado en la parte superior del horno, este cuenta con el quemador de gas encargado de generar la llama dentro de la hornilla, también se cuenta con un ventilador

principal encargado de succionar aire para que circule a través de la hornilla y también se cuenta con cuatro ventiladores ubicados en cuatro ductos en las cuatro esquinas inferiores de la hornilla, dos de ellos se encargan de llevar el aire caliente hacia las diferentes etapas del horno y los otros dos se encargan de succionar el aire y reincorporarlo a la hornilla luego de que el aire haya intercambiado calor con las láminas. En lo interno de las tres etapas del horno se colocan ventiladores axiales que ayudan a impulsar el aire hacia las láminas, en el caso del horno 2 cuenta con 17 ventiladores internos, el giro de los ventiladores internos y los ventiladores de los ductos cambia cada cierta cantidad de ciclos, esto con la intención de secar la lámina de forma homogénea, la duración de los ciclos dependerá de las dimensiones y espesores de las láminas que se estén procesando en el horno.

Los hornos tienen chimeneas que permiten el escape de aire caliente hacia el ambiente, esto se utiliza para regular la temperatura y también la humedad que se evapora de las láminas. Además, en la hornilla se ubica la chimenea principal, justo encima del ventilador principal, esta chimenea, a diferencia de las demás, cumple la función de proteger la hornilla y evitar problemas de sobre calentamiento que puedan provocar incendios o algún riesgo para la seguridad del personal y la planta.

En la descarga del horno los equipos utilizados son muy similares a los utilizados en la carga, para este caso el voller saca las canastas hasta la posición de descarga y los pistones neumáticos la mantienen fija y alineada para que cada robot pueda tomar las láminas y separadores respectivamente, las láminas son colocadas en una tarima ubicada en una banda transportadora de rodillos, esta banda se encarga de llevar las tarimas con láminas hasta la siguiente etapa del proceso productivo, por otra parte, el robot de separadores coloca los separadores en una canasta vacía que el levitador mantiene estático, una vez que se colocan todos los separadores el levitador baja y el transferidor mueve las canasta hasta el carril de retorno que va hacia el área de carga del horno.

En la figura 4 se muestra el diagrama de flujo de proceso general en la zona de producción secundaria, Cuando las tarimas con láminas llegan al final de la banda transportadora de rodillos puede pasar por dos líneas diferentes dependiendo del producto requerido por producción, la primera línea es la escuadradora donde en un principio se realiza cortes longitudinales y transversales a la lámina en la sierra doble posterior a esto el Robot FANUC toma estas laminas y ya sea las saque de la línea para ser almacenadas o para pasar a la lijadora donde se ajusta el espesor de la lámina y posterior a esto pasa por la escuadradora donde se da el ajuste final a las láminas de las dimensiones requeridas, finalmente a través de la banda se llevan las láminas hasta el Robot KUKA para agrupar las láminas y que puedan ser almacenadas, en esta línea se producen laminas para piso, entrepiso, paredes (Plyrock) y otros donde la lámina se mantiene muy similar a las dimensiones originales.

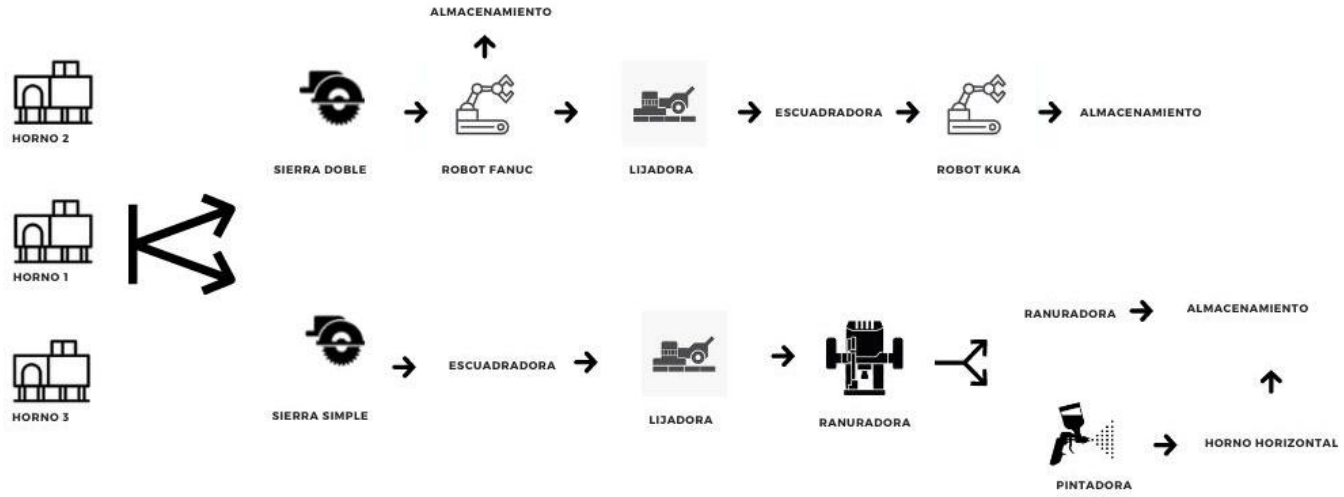


Figura 4. Diagrama de flujo producción secundaria. Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, la otra línea puede empezar el proceso en la sierra simple donde se cortan pequeñas partes del material para recuperarlo para el volver a ser utilizado en el proceso, o puede iniciar directamente en la línea de maquinados sin pasar por la sierra simple, en la línea de maquinados se suben las láminas a la línea

con la plancha de carga y luego se realizan cortes longitudinales a la lámina de manera que se separa la lámina en diferentes secciones similar a tablas, en este proceso la lámina pasa por la escuadradora, lijadora y ranuradora. Una vez que la lámina es cortada puede seguir dos caminos distintos el primero es la molduradora donde se le da acabado especial a la lámina para las uniones y estética, luego pasa por la Banda de ligas verdes y ligas rojas donde finalmente es agrupada para almacenar el producto. El otro camino es la línea de TRIMS donde las secciones de láminas cortadas pasan por la Pintadora donde se agrega el sellador y la pintura, luego pasa por el Horno Horizontal donde se seca la pintura, luego pasa por el enfriador de varillas para que los operarios puedan manipular las láminas, finalmente pasa por la mesa de salida de rodillos donde se agrupan y se almacena el producto final de esta línea. Finalmente cabe mencionar los filtros presentes en esta área del proceso porque se genera mucho polvo y desechos, la Sierra doble, sierra simple, La Lijadora de Maquinados y la escuadradora tienen un filtro aparte y una parte de lo recuperado va hacia el filtro azul, además lo recuperado de la Molduradora y Ranuradora se lleva directamente hacia el filtro azul donde finalmente se lleva hacia etapas posteriores del proceso para volver a ser utilizado en la producción. Con lo anterior se concluye el proceso de fibrocemento con esta descripción se comprende mejor la información obtenida de la base de datos de la empresa.

14.2. Análisis del consumo general de energía.

Teniendo claro el proceso las diferentes áreas de la planta, se analiza la información proporcionada por la empresa en materia energética. Como primer dato importante se analizan las principales fuentes de energía de la empresa, como se mencionó anteriormente se utilizan tres principales fuentes de energía, el gas licuado de petróleo (GLP), electricidad y Diesel. En la tabla 2 se muestra el consumo histórico de estas tres fuentes de energía para el periodo de 2018 a 2021. Además, se puede observar el total de energía consumido, todo esto convertido a las mismas unidades (mega joule). Para tener una mejor idea de la distribución de esta

energía se realiza un gráfico con los porcentajes de consumo, que se muestran en la figura 1, donde se puede notar que el principal consumo de energía corresponde al GLP con un 73% del total, seguido de la electricidad con un 25% del total y finalmente el diésel con 2% del total.

TABLA 2. CONSUMO ANUAL HISTÓRICO DE ENERGÍA EN MEGAJOULE.

Año	Consumo Anual por tipo de Energía (MJ)			
	Electricidad	GLP	Diésel	Total
2018	39 249 000	101 703 887	2 192 718	143 145 605
2019	41 913 900	103 553 392	2 326 569	147 793 861
2020	42 840 000	110 560 784	2 469 219	155 870 003
2021	43 539 300	126 264 785	2 728 086	172 532 172

Figura 5. Distribución del consumo total por tipo de energía. Fuente: Elaboración propia.

De la figura 5 se podría interpretar que el GLP seria la fuente de energía de mayor interés, debido a su alto volumen de consumo de energía, sin embargo, se debe complementar esta apreciación con los costos

asociados a ese consumo, ya que el modo de cómo se factura el consumo de energía varía según el tipo de energía y su proveedor.

En el caso del GLP se factura por litro consumido y el proveedor es la empresa Gas Nacional Z. S.A., quien se encarga de abastecer los tanques de almacenamiento presentes en Plycem. Para el caso de la electricidad se utiliza el modelo tarifario TMT-b y el proveedor es JASEC cabe aclarar que en este modelo tarifario se facturan montos relacionados tanto al consumo en kW/h como a la demanda de potencia en kW según lo estipulado por ARESEP. Para el caso del diésel es facturado por litros consumidos.

En la tabla 3 se muestra la facturación por mes, en colones, de las tres fuentes de energía, para este caso solo se muestra el histórico para el año 2021, ya que es el pedido más reciente y reflejará mejor la situación actual de la planta, además, a partir del mes de noviembre del 2021 se cuenta con medidores en tiempo real para el GLP y la electricidad lo que representarían datos más reales que en los periodos anteriores.

TABLA 3. FACTURACIÓN SEGÚN TIPO DE ENERGÍA.

Fecha	**Facturación según tipo de energía (¢)**		
	Electricidad	**GLP**	**Diésel**
ene-21	78 847 736	82 479 873	14 819 669
feb-21	75 490 672	98 433 567	9 468 867
mar-21	82 423 184	119 243 967	15 493 997
abr-21	83 610 403	110 483 278	15 124 443
may-21	72 552 192	128 282 495	18 054 344
jun-21	72 086 369	120 070 447	16 239 346
jul-21	62 841 793	124 715 417	17 590 740
ago-21	65 541 690	124 809 860	18 619 245
sep-21	62 010 126	125 478 788	14 382 673
oct-21	60 997 600	144 218 953	16 213 578
nov-21	60 990 107	178 553 089	12 522 477
dic-21	59 523 168	175 330 413	11 500 097
Total	836 915 039	1 532 100 148	180 029 475

Además, se calcula los costos totales por facturación energética para el pedido 2021 y se realiza el grafico correspondiente que se muestra en la figura 6, es recalcable que en relación con los costos el GLP representa el mayor porcentaje de la facturación anual con un 60% del total, seguido por la electricidad con un 33% y finalmente el diésel con un 7% del total.

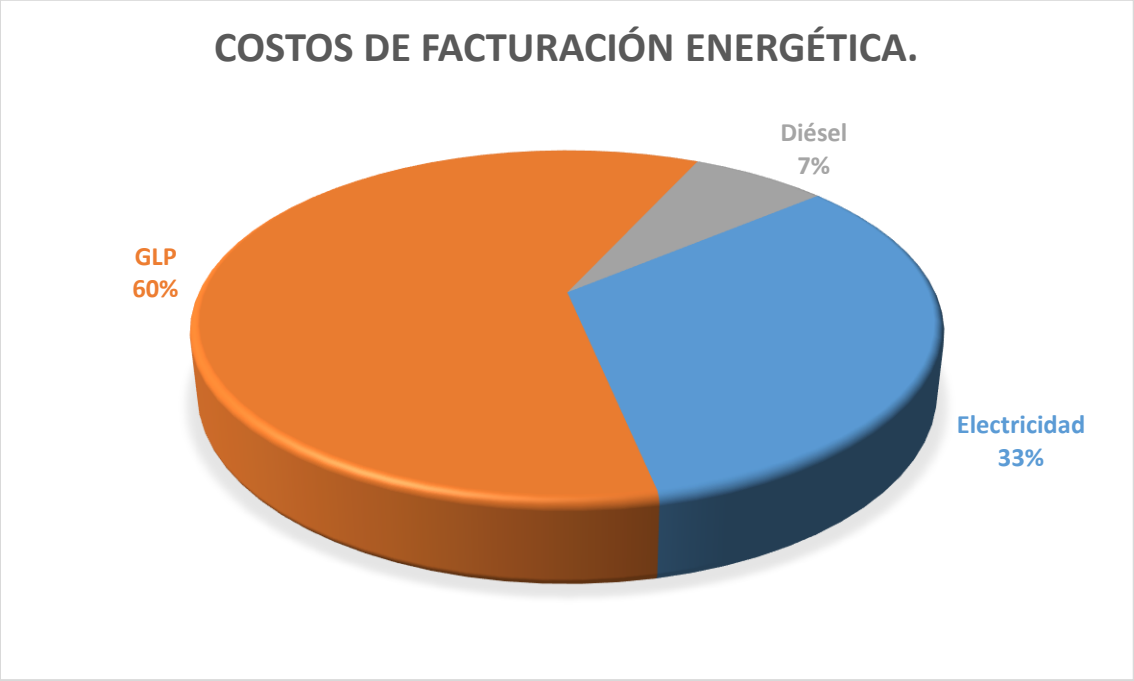


Figura 6**.** Facturación del consumo energía para el año 2021. Fuente: Elaboración propia.

Los datos mostrados anteriormente dan una visión general de la situación energética de la empresa y permiten empezar a definir cuales fuentes de energía tienen mayor relevancia como es el caso del GLP y electricidad a la cuales se les debe prestar mayor atención en el desarrollo del proyecto.

Teniendo mayor claridad de la situación energética general de la empresa se procede a realizar un análisis más profundo del uso y consumo por cada tipo de energía de la empresa con la información disponible en la base de datos.

14.3. Análisis del uso y consumo de GLP.

En primera instancia, se analizará el uso y consumo de GLP en Plycem, en la tabla 4 se muestra las áreas o procesos donde se utiliza el GLP, además, del consumo histórico anual para el periodo comprendido desde el año 2019 al 2021.

TABLA 4. CONSUMO ANUAL HISTÓRICO DE GLP EN MEGAJOULE NIVEL 1

Uso de la energía	**Consumo energético (MJ)**				**Coeficiente de variación**
	2021	**2020**	**2019**	**Promedio**	
Producción de fibrocemento	124 589 781	108 341 797	101 102 831	111 344 803	0,11
Transporte de carga en planta	416 820	552 540	881 247	616 869	0,39
Producción de TINACOS	1 258 184	1 666 446	1 569 314	1 497 982	0,14

Además, en la tabla 4 se toma el promedio del consumo registrado para estos años, sin embargo, al calcular el coeficiente de variación, se puede notar que algunos de estos valores superaran el 30% lo cual se puede considerar como poco aceptable según Brown (1998), por este motivo no se considera el promedio como una medida que se ajuste a al verdadero comportamiento general de los datos; en su lugar se toma los datos del año 2021 como referencia para cuestiones de comparación de los datos, además, de ser el periodo más reciente y refleja mejor la condición actual de la empresa.

Según los resultados que se muestran en la tabla 4, en este primer nivel se puede apreciar claramente que la producción de fibrocemento es el principal consumidor de energía para toda la planta con una amplia diferencia en comparación con los demás sectores y representaría, por concepto de consumo de GLP, el sector de mayor interés para el desarrollo del proyecto, recordando que es el GLP la fuente de energía con mayores costos por facturación energética para la compañía.

Profundizando en el uso de energía para el GLP se obtiene la tabla 5, donde se detalla los sistemas electromecánicos que consumen GLP y la cantidad histórica consumida para los periodos entre 2019 a 2022, de los sistemas electromecánicos pertenecientes a la producción de fibrocemento se puede notar que la mayoría pertenecen a la zona de producción secundaria. Algunos de los datos mostrados en la tabla 5, actualmente son medidos en tiempo real como es el caso de la medición en el horno 1, horno 2, horno 3 y las calderas, en otros casos y para periodos anteriores el dato de consumo energético se realizaba mediante una aproximación partiendo en porcentajes para cada equipo según la potencia de este.

TABLA 5. CONSUMO ANUAL HISTÓRICO DE GLP EN MEGAJOULE NIVEL 2

Uso de la energía		**Consumo energético (MJ)**				**Coeficiente de variación**
		2021	**2020**	**2019**	**Promedio**	
Producción de fibrocemento	Horno 1	37 219 372	35 201 725	32 658 782	35 026 626	0,07
	Horno 2	31 836 175	23 685 421	25 053 888	26 858 495	0,16
	Horno 3	36 637 409	33 203 382	28 224 736	32 688 509	0,13
	Calderas	17 730 878	16 251 270	15 165 425	16 382 524	0,08
	Horno teja	1 165 947	-	-	388 649	1,73
Transporte de carga en planta	Montacargas	416 820	552 540	881 247	616 869	0,39
Producción de TINACOS	Rotomoldeo	1 258 184	1 666 446	1 569 314	1 497 982	0,14

Al igual que en el caso anterior, se puede notar de en la tabla 5 que el coeficiente de variación es muy alto en algunos casos, por lo tanto, se considera el período 2021 para generar el grafico de distribución porcentual del consumo de GLP según el uso de energía a nivel 2 como se puede apreciar en la figura 7.

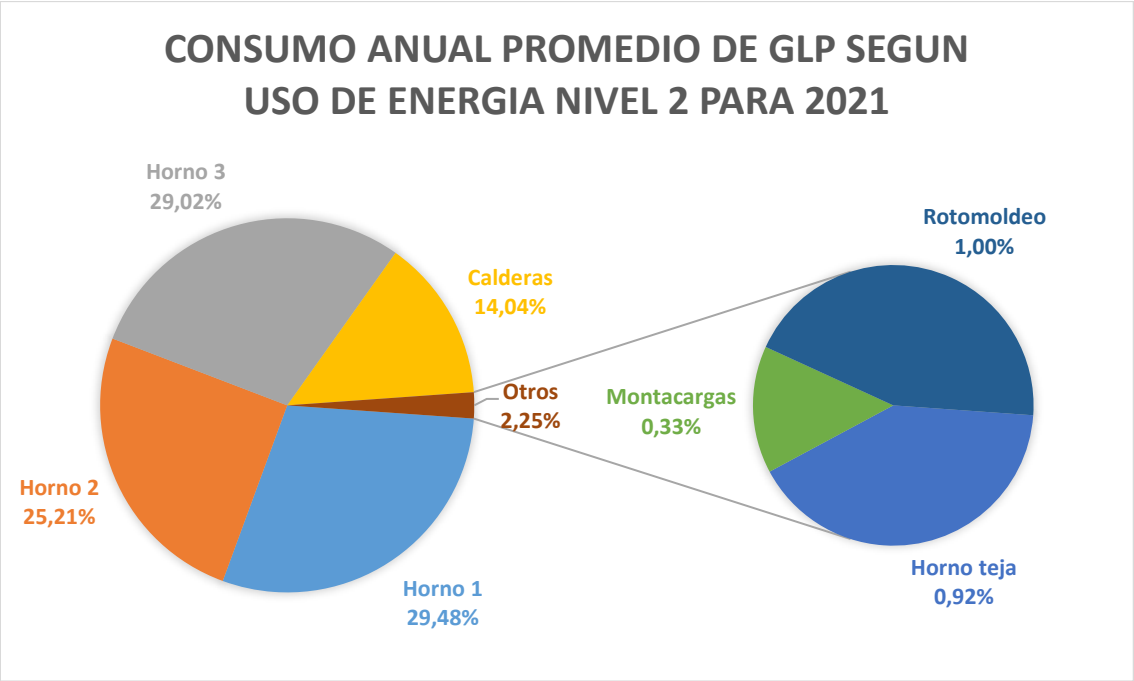


Figura 7**.** Distribución del consumo de GLP según uso de la energía nivel 1. Fuente: Elaboración propia.

Para facilitar la identificación de los sistemas electromecánicos de mayor relevancia, se utiliza un diagrama de Pareto que se puede apreciar en la figura 8, donde se observa el resultado obtenido y se puede concluir que para el consumo de GLP los sistemas electromecánicos con mayor consumo energético son: Horno 1, Horno 3 y Horno 2; todos ellos pertenecientes al área de producción secundaria en la etapa de secado de las láminas.

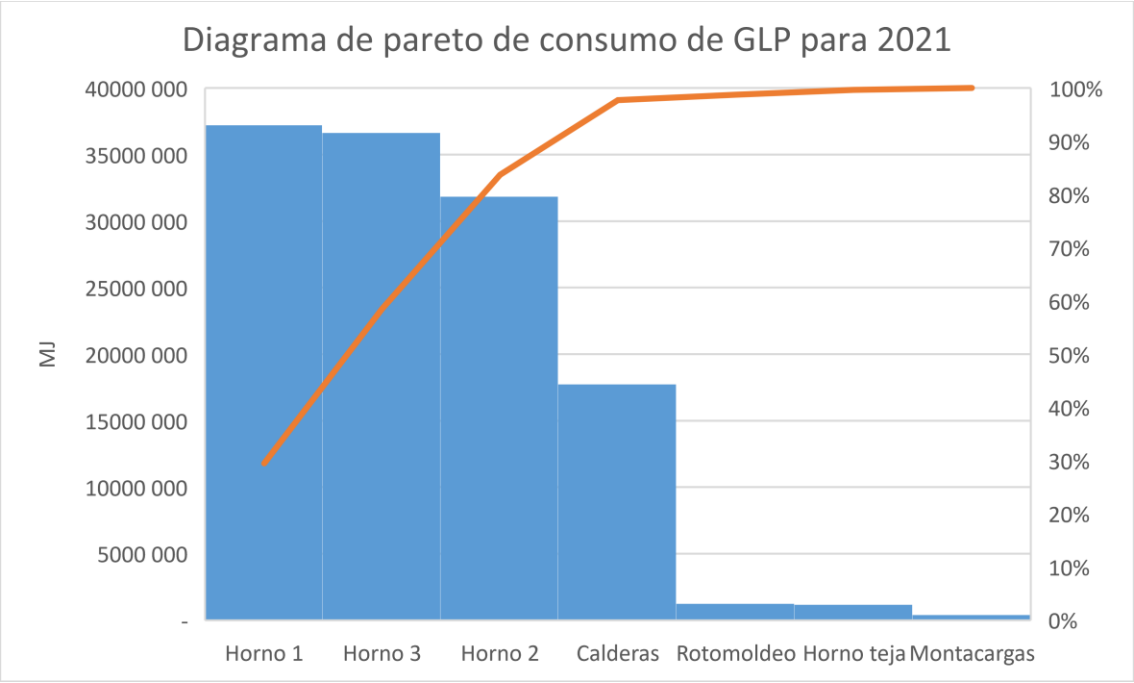


Figura 8. Diagrama de Pareto para los equipos consumidores de GLP. Fuente: Elaboración propia.

14.4. Análisis del uso y consumo de electricidad.

Siguiendo un procedimiento similar al desarrollado para el caso anterior, se procede a analizar los datos referentes al uso y consumo de energía eléctrica para Plycem tomando como referencia nuevamente la base de datos de energética de la compañía.

En la tabla 6 se encuentra el consumo de energía eléctrica general en nivel 1 para la compañía donde se separan en solo dos secciones la producción de fibrocemento y la sección de otros procesos y tomando el histórico de los años 2019 al 2021.

TABLA 6. CONSUMO ANUAL HISTÓRICO DE ELECTRICIDAD EN MEGAJOULE NIVEL 1

Uso de la energía	Consumo (MJ)				Coeficiente de variación
	2021	2020	2019	Promedio	
Producción de fibrocemento	43 196 865	42 371 362	41 453 709	42 340 645	0,02
Otros procesos	342 435	468 638	460 191	423 755	0,17

En la tabla 6 se puede apreciar que los valores de coeficiente de variación no son tan altos, por lo que el promedio si representa una representación significativa de los datos, sin embargo, para mantener la consistencia con los resultados analizados en las secciones pasadas, se decide tomar como referencia el año 2021 para realizar el gráfico con la distribución porcentual del consumo de electricidad a nivel 1.En los resultados de la tabla 6 se puede apreciar que existe un diferencia significativa entre el consumo de electricidad de la producción de fibrocemento y los otros procesos, en términos relativos se tiene que el consumo de electricidad en la producción de fibrocemento es de un 99%.

En la tabla 7, se muestra en mayor detalle el desglose del uso y consumo de energía eléctrica en la empresa, en la producción de fibrocemento se detalla más individualmente los sistemas electromecánicos ya que es la zona de mayor impacto en energía eléctrica, mientras que en los otros procesos se describe de manera más general ya que su impacto energético es menor. Los datos mostrados en la tabla 7 actualmente se obtienen de mediciones en tiempo real realizadas en los tableros correspondientes principalmente en la producción de fibrocemento, para el consumo reportado en periodos anteriores a la implementación de la medición en tiempo real, se realizaba mediante aproximaciones considerando la potencia de los equipos y las horas de trabajo.

TABLA 7. CONSUMO ANUAL HISTÓRICO DE ELECTRICIDAD EN MEGAJOULE NIVEL 2

Uso de la energía		**Consumo (MJ)**				**Coeficiente de variación**
		2021	**2020**	**2019**	**Promedio**	
Producción de fibrocemento	Máquina de placas 1	8 806 710	6 994 842	6 397 025	7 399 526	0,17
	Máquina de placas 2	7 494 175	6 320 516	6 560 476	6 791 722	0,09
	Servicios auxiliares	6 930 353	6 046 981	3 982 568	5 653 300	0,27
	Horno 1	4 113 056	5 401 067	5 528 393	5 014 172	0,16
	Horno 2	3 487 198	4 464 006	5 066 263	4 339 156	0,18
	Horno 3	4 176 369	5 961 874	5 833 724	5 323 989	0,19
	Sierra shelling simple 1	356 685	376 918	351 783	361 795	0,04
	Sierra shelling doble	2 155 588	1 565 096	1 292 596	1 671 094	0,26
	Escuadradora	549 888	900 611	632 968	694 489	0,26
	Línea maquinados	1 439 008	1 331 690	1 632 531	1 467 743	0,10
	Línea trims	3 328 339	2 689 981	1 482 864	2 500 395	0,37
	Almacenes	359 496	317 779	295 371	324 215	0,10
Otros procesos	Rotomoldeo	58 224	130 068	121 539	103 277	0,38
	Instalaciones administrativas	225 116	338 570	323 358	295 681	0,21
	Framecad	59 095	-	-	19 698	1,73

Igual que en los casos anteriores, se toma el año 2021 como referencia para la distribución de consumo energético de la compañía, el gráfico generado se puede ver en la figura 9, se excluyen de este gráfico los sistemas electromecánicos que no han presentado consumo de energía eléctrica en el 2021.

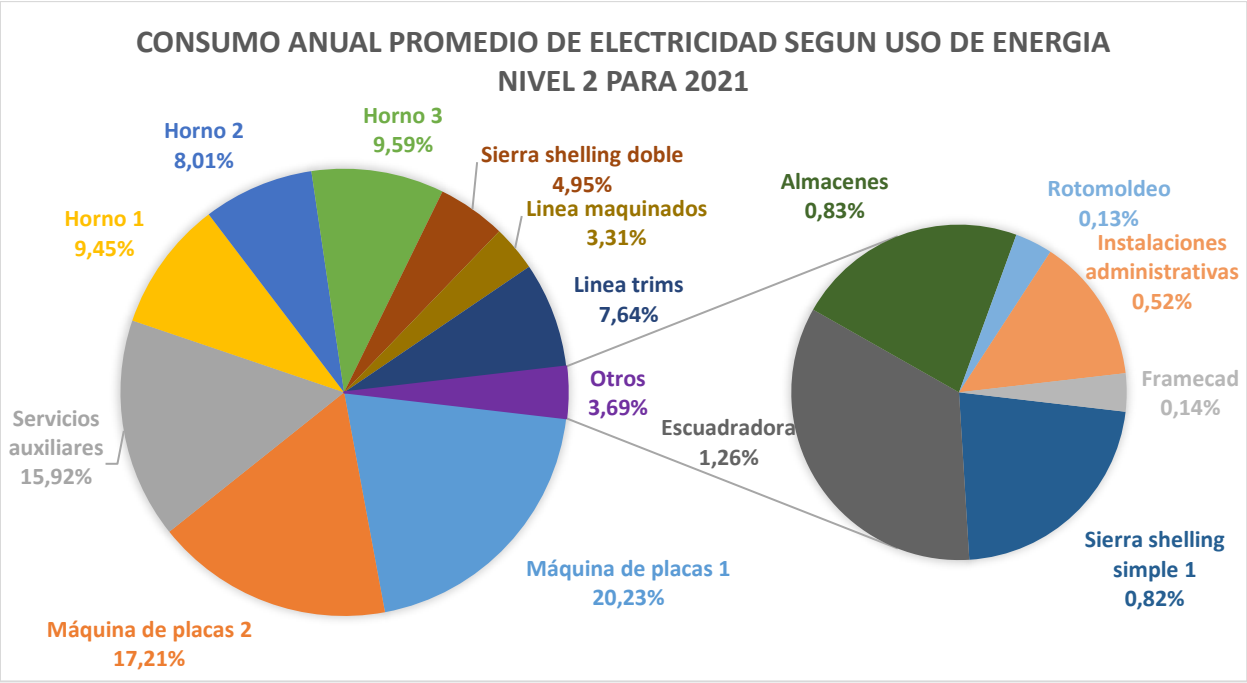


Figura 9. Distribución del consumo de electricidad según uso de la energía nivel 2. Fuente: Elaboración propia.

Para una mejor interpretación de la información recolectada, se realiza un gráfico de Pareto que se muestra en la figura 10, con la intención de visualizar los sistemas electromecánicos de mayor impacto en el consumo de electricidad. Utilizando el principio de Pareto se logra identificar que los sistemas electromecánicos con mayor impacto en el consumo de electricidad son: Máquina de placas 1, Máquina de placas 2, Servicios auxiliares, Horno 3, Horno 1 y Horno 2. Es importante mencionar que cuando se hace referencia a las máquinas de placas se asocia con los sistemas de las zonas de producción primaria y fibras en conjunto; también cabe aclarar que los servicios auxiliares hacen referencia al cuarto de compresores y calderas.

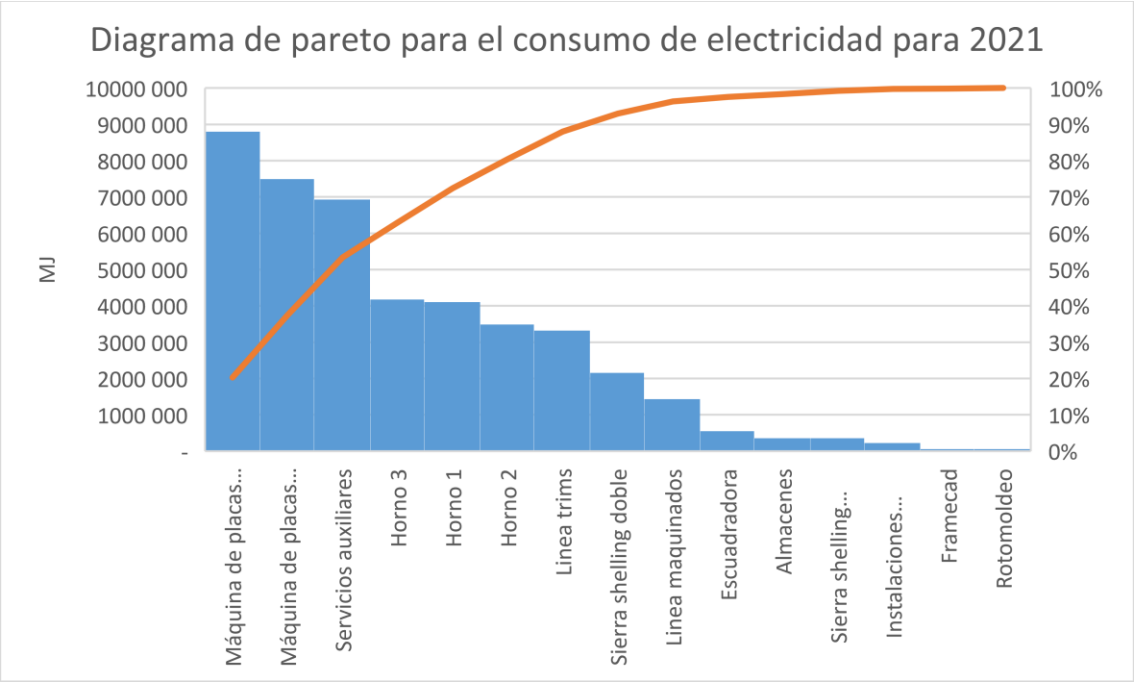


Figura 10. Diagrama de Pareto para los equipos consumidores de electricidad. Fuente: Elaboración propia.

14.5. Análisis del uso y consumo de diésel.

Para el caso de uso y consumo de diésel, de igual forma se toma la información de la base de datos de Plycem, en la tabla 8 se muestra el desglose de consumo a nivel 2 para el diésel, se puede notar que la mayoría se utiliza en equipos de transporte y de emergencia.

TABLA 8. CONSUMO ANUAL HISTÓRICO DE DIÉSEL EN MEGAJOULE NIVEL 2

Uso de la energía	Consumo (MJ)				Coeficiente de variación
	2021	2020	2019	Promedio	
Montacargas producción	1 747 030	1 580 271	1 077 353	1 468 218	0,24
Montacargas almacenes	874 624	829 925	973 947	892 832	0,08
Minicargador	-	12 319	228 036	80 118	1,60
Bomba contra incendios	12 319	14 078	14 078	13 492	0,08
Plantas de emergencia	-	-	-	-	-
Camión Asume Tu Papel	39 103	28 333	29 530	32 322	0,18
Vehículos comerciales	8 447	4 294	-	4 247	0,99
Mi Concreto	46 564	-	3 625	16 730	1,55

En este caso también se toma como referencia el año 2021 para mantener la concordancia con los apartados anteriores, de esta información se genera el gráfico mostrado en la figura 11 con la distribución del consumo de diésel en Plycem.

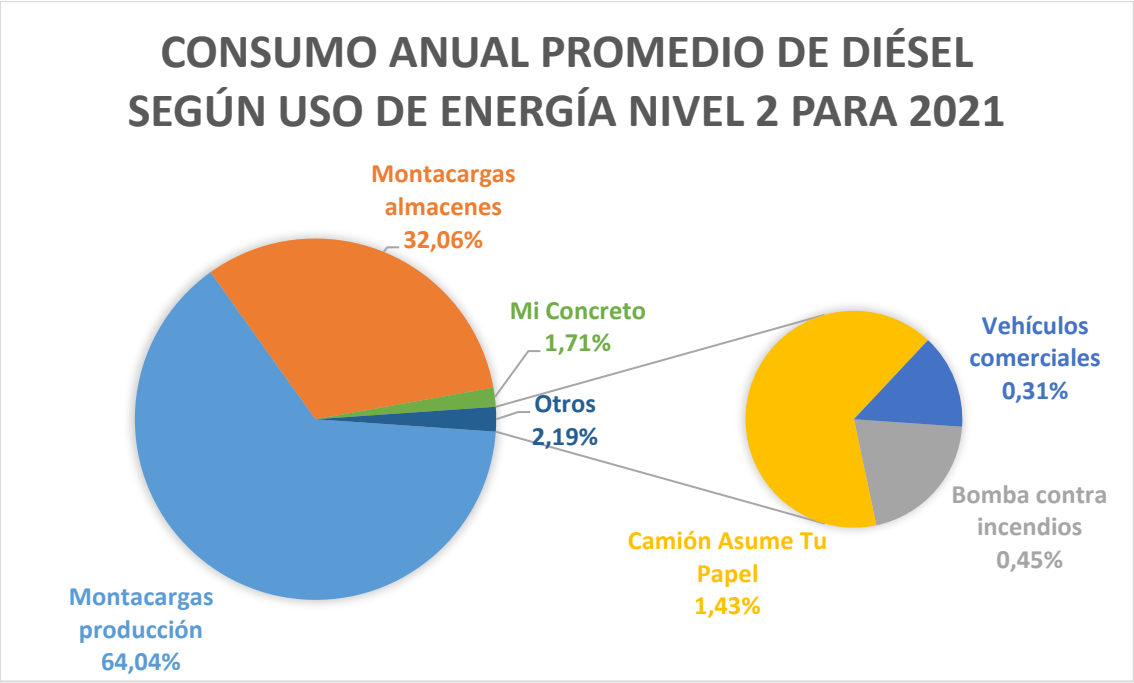


Figura 11. Distribución del consumo de diésel según uso de la energía nivel 2. Fuente: Elaboración propia.

Para una mejor interpretación de los datos obtenidos se realiza un diagrama de Pareto para el consumo de diésel, este gráfico se muestra en la figura 12, de este se puede interpretar que los montacargas de producción y montacargas de almacenes representan los equipos con mayor impacto en referencia al consumo de diésel.

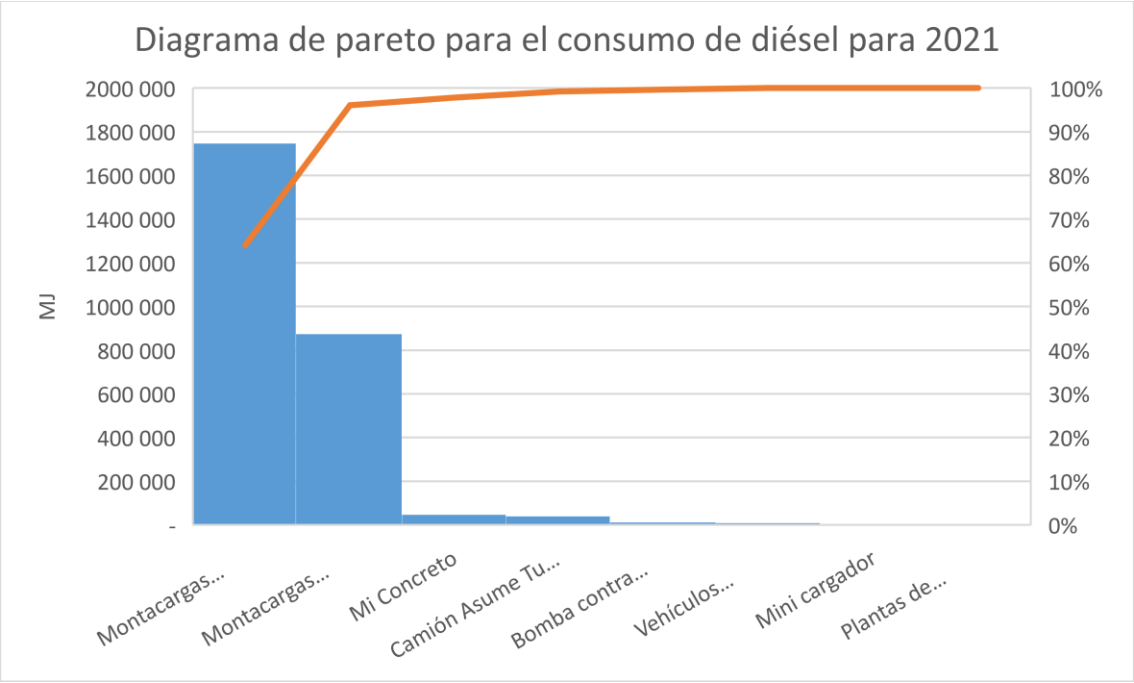


Figura 12. Diagrama de Pareto para los equipos consumidores de diésel. Fuente: Elaboración propia.

14.6. Análisis de los Usos Significativos de Energía.

Una vez realizado el análisis por tipo de energía e identificando los sistemas y equipos electromecánicos con mayor impacto energético según los correspondientes diagramas de Pareto mostrados anteriormente, se prepara una tabla comparativa con dichos equipos para identificar a nivel general cual tiene mayor impacto a nivel energético, los resultados de dicha tabla se muestran en la tabla 9, como se puede observar para esta parte del análisis se excluyen los equipos que consumen diésel, ya que como se pudo constatar anteriormente el diésel representa un 2% del consumo total de la planta, además, que si se comparan los equipos con mayor consumo de diésel con los equipos de mayor consumo de GLP o electricidad estos últimos los superan con amplia diferencia. Incluso, si se comparan los montacargas de producción con la línea trims esta última supera el consumo de los montacargas aun estando la línea trims fuera del 20% de interés según el principio de Pareto, pero con esta comparativa se ejemplifica el bajo consumo de diésel para la compañía y la razón del porque se excluye de la tabla 9.

TABLA 9. CONSUMO ANUAL HISTÓRICOS PARA LOS USES.

Uso de la energía		Consumo (MJ)				Coeficiente de variación
		2021	2020	2019	Promedio	
GLP	Horno 1	37 219 372	35 201 725	32 658 782	35 026 626	0,07
	Horno 2	31 836 175	23 685 421	25 053 888	26 858 495	0,16
	Horno 3	36 637 409	33 203 382	28 224 736	32 688 509	0,13
	Calderas	17 730 878	16 251 270	15 165 425	16 382 524	0,08
Electricidad	Máquina de placas 1	8 806 710	6 994 842	6 397 025	7 399 526	0,17
	Máquina de placas 2	7 494 175	6 320 516	6 560 476	6 791 722	0,09
	Horno 1	4 113 056	5 401 067	5 528 393	5 014 172	0,16
	Horno 2	3 487 198	4 464 006	5 066 263	4 339 156	0,18
	Horno 3	4 176 369	5 961 874	5 833 724	5 323 989	0,19
	Servicios auxiliares	6 930 353	6 046 981	3 982 568	5 653 300	0,27

Como se puede observar en la tabla 9, algunos equipos presentan tanto consumo de GLP como de electricidad como es el caso de los hornos, en estos casos se unificará el consumo total para poder comprar el impacto general de cada equipo indiferentemente del tipo de energía que consuma. Además, se toma como referencia el año 2021 para el análisis para mantener la consistencia con los casos anteriores. En la figura 13 se muestra un diagrama de Pareto para los sistemas electromecánicos de mayor impacto energético.

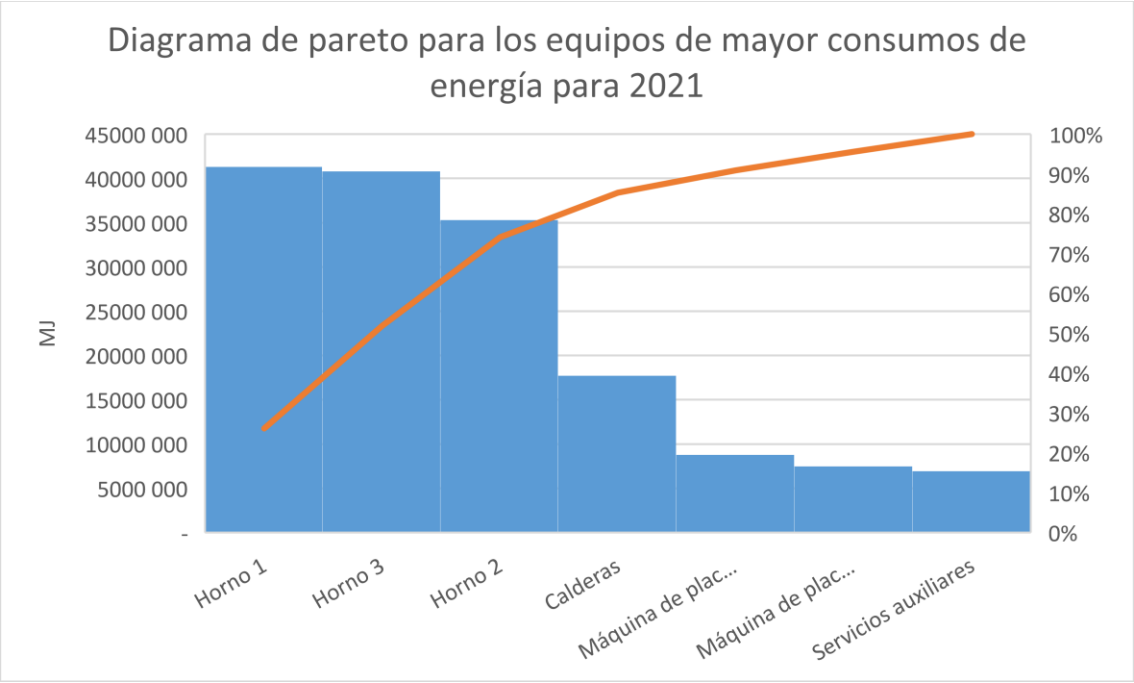


Figura 13. Diagrama de Pareto para los equipos de mayor consumo de energía. Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo el principio de Pareto en la figura 13 se puede deducir que el Horno 1, Horno 2 y Horno 3 representan los sistemas de mayor impacto a nivel general en la empresa y por consiguiente los sistemas de mayor interés para una posible aplicación del mantenimiento basado en la condición que se pretende proponer en este proyecto.

Teniendo definidos los sistemas electromecánicos de mayor interés se procede a definir uno de ellos en específico, para esto se realiza una comparativa entre los tres hornos de su rendimiento energético para el año 2021, para esto se propone trazar un indicador relacionado con la producción, realizando una analogía a lo planteado por Portillo, et al., (2020) donde se describe el planteamiento de este tipo de indicadores energéticos. Para lo anterior, se procede a calcular el precio por litro de GLP para cada mes del año 2021 con los datos de consumo de GLP en litros y la facturación reportada para cada mes según la base de datos de energía de la empresa como se puede observar en la tabla 10.

TABLA 10. PRECIO POR LITRO DE GLP MENSUAL PARA PLYCEM S.A.

Fecha	Consumo (L)	Facturación (¢)	Precio por litro (¢/L)
ene-21	375 969	82 479 873	219
feb-21	410 009	98 433 567	240
mar-21	448 155	119 243 967	266
abr-21	393 503	110 483 278	281
may-21	459 134	128 282 495	279
jun-21	450 162	120 070 447	267
jul-21	436 955	124 715 417	285
ago-21	394 434	124 809 860	316
sep-21	391 160	125 478 788	321
oct-21	425 713	144 218 953	339
nov-21	462 690	178 553 089	386
dic-21	454 878	175 330 413	385

Teniendo el precio por litro se procede a calcular la facturación por consumo de GLP para cada uno de los hornos según su respectivo consumo, además, se complementa esta información con la producción en toneladas para cada uno de los hornos según los reportes de producción facilitados por la empresa. En la tabla 11 se muestra los resultados para el horno 1.

TABLA 11. LITROS DE GLP CONSUMIDOS POR CADA TONELADA PRODUCIDA Y COSTOS ENERGÉTICOS POR CADA TONELADA EN EL HORNO 1.

Fecha	Consumo horno 1 (L)	Producción (ton)	Litro por tonelada (L/ton)	Facturación mensual (¢)	Costos por tonelada (¢/ton)
ene-21	123 126	2 187	56,29	27 011 266	12 349
feb-21	142 397	2 766	51,48	34 186 216	12 358
mar-21	122 735	2 878	42,65	32 657 074	11 348
abr-21	141 123	2 766	51,02	39 622 787	14 324
may-21	145 105	2 955	49,10	40 542 623	13 719
jun-21	149 297	3 036	49,18	39 821 451	13 117
jul-21	139 954	2 649	52,84	39 945 616	15 081
ago-21	129 683	2 480	52,29	41 035 359	16 545
sep-21	77 743	1 921	40,48	24 939 023	12 985
oct-21	103 879	2 113	49,17	35 191 190	16 657
nov-21	103 946	2 062	50,41	40 112 845	19 452
dic-21	125 165	2 579	48,54	48 244 167	18 709

En la figura 14 se puede apreciar el comportamiento que ha tenido en el último año el consumo de GLP en litros por cada tonelada producida tomando como referencia el indicador energético planteado por Zúñiga (2014). Este gráfico representa un indicador del rendimiento energético del horno, donde se espera que por cada tonelada producida tener el menor consumo de GLP posible, ya que esto significaría una eficiencia alta para el horno.

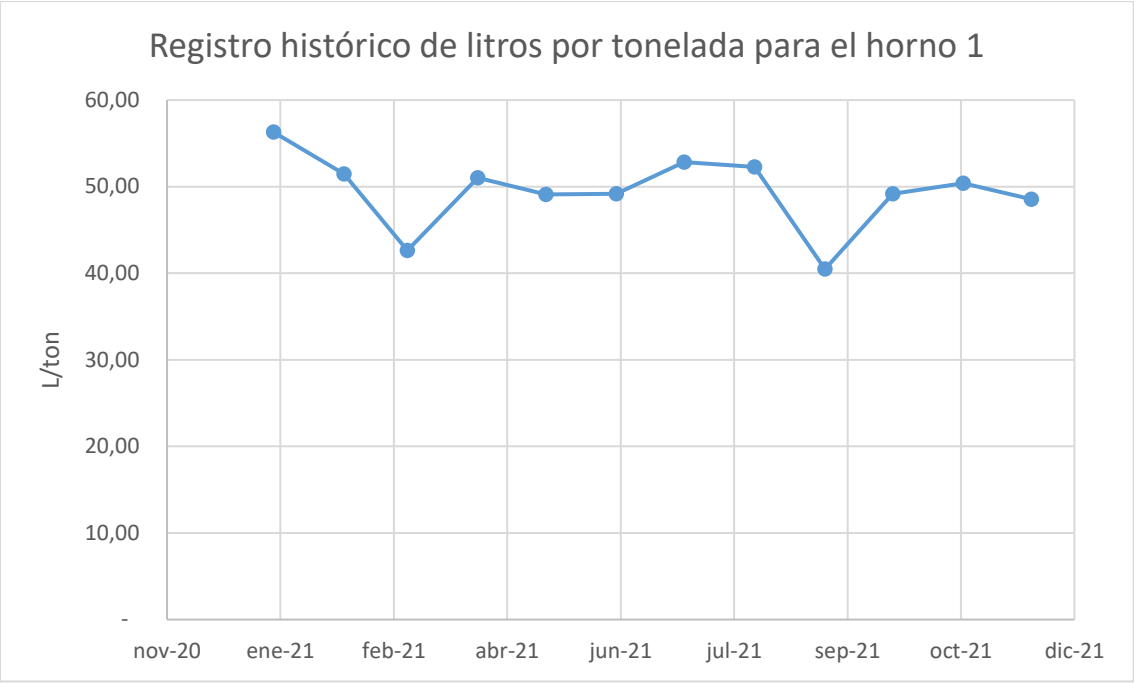


Figura 14. Comportamiento histórico del consumo de litros de GLP por tonelada producida. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del horno 2 y horno 3 se realizó el mismo procedimiento, sin embargo, para no volver tan repetitiva esta sección los resultados para estos hornos se muestran en la sección de anexos en la tabla A3 y tabla A4 respectivamente, además de los gráficos del comportamiento histórico del consumo de GLP por tonelada. En la figura 15 se observa la comparación de los tres hornos en donde se puede observar el horno 2 presenta un mayor consumo de litros de GLP por cada tonelada producida para los últimos meses.

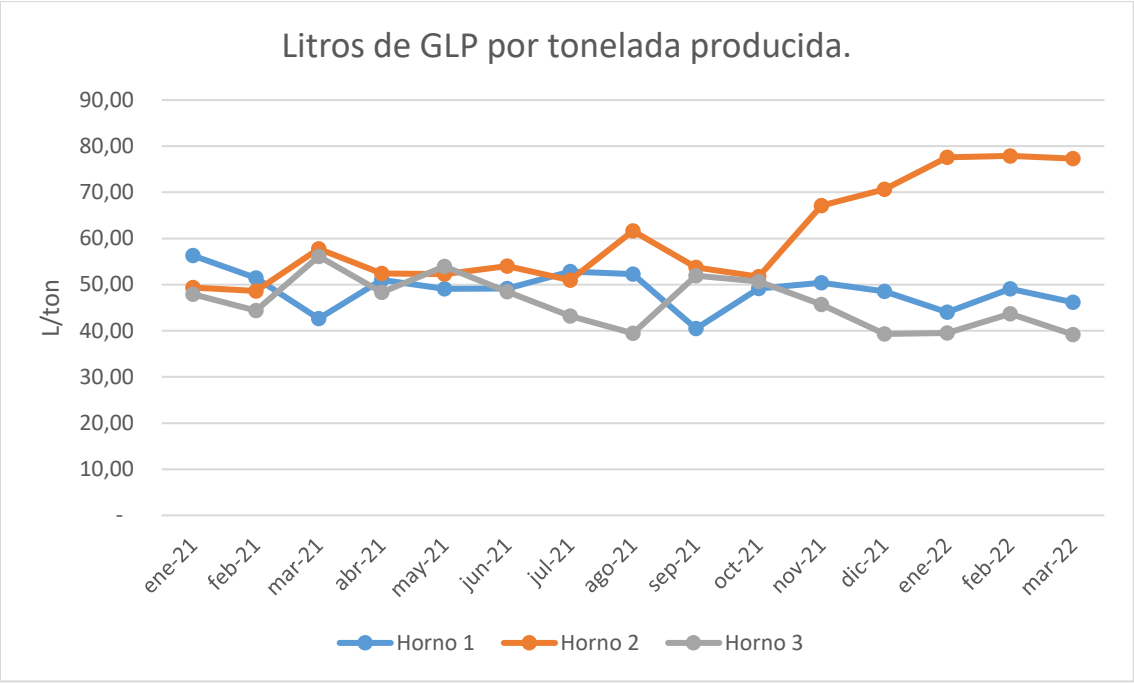


Figura 15. Litros de GLP por cada tonelada producida para cada horno. Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos para cada horno se procede elaborar una comparación del comportamiento de los costos asociados a la facturación energética por cada tonelada producida, en la figura 16 se puede observar el comportamiento de los tres hornos. Al igual que en el caso anterior, este grafico es un indicio del funcionamiento adecuado del horno, pero cuenta con la ventaja de estar expresado en dinero lo que permite establecer con mayor facilidad análisis económicos relacionados con el rendimiento energético de los hornos.

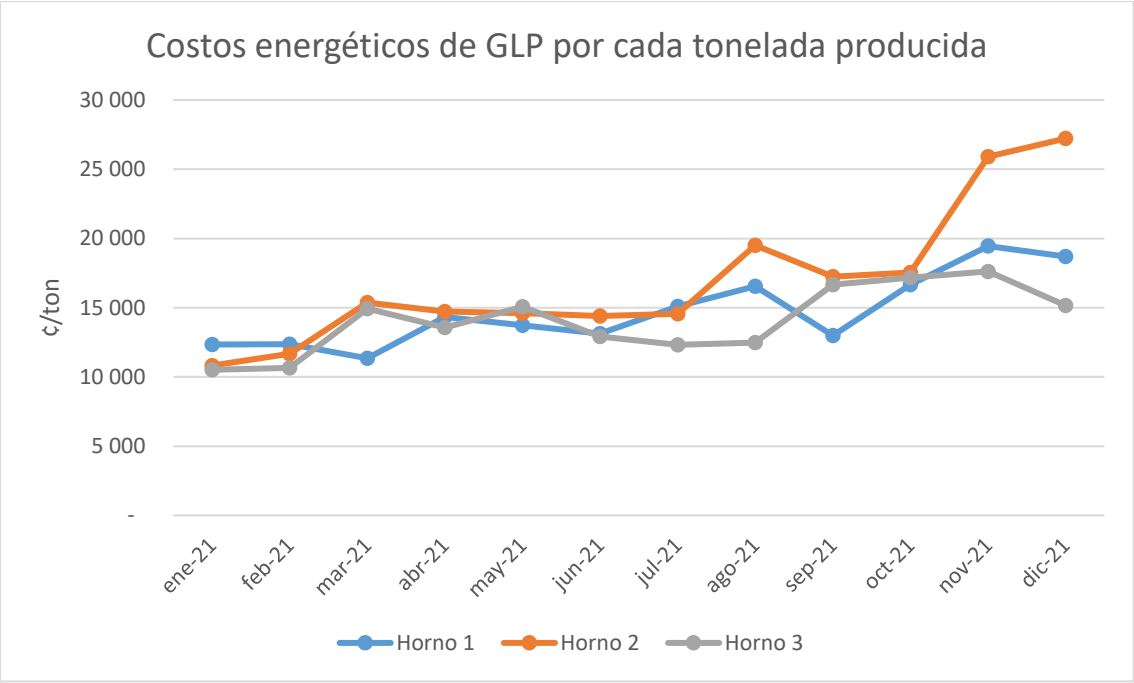


Figura 16. Costos de facturación de GLP por cada tonelada producida en los hornos. Fuente: Elaboración propia.

Como es posible apreciar en la figura 16, al comparar el comportamiento histórico de los tres hornos se nota que el horno 2 presenta mayores costos energéticos por tonelada producida en los últimos meses en comparación con los otros dos hornos, esto es un indicio importante, ya que, presenta una tendencia de un rendimiento cada vez menos eficiente. Es importante aclarar, que los datos reportados de consumo de GLP del mes de noviembre en adelante son medidos a través de flujómetros y la medición se realiza en tiempo real, por lo tanto, son datos con mayor precisión que los reportados en meses anteriores.

Otro aspecto por considerar es la capacidad de los quemadores de cada horno, ya que al ser quemadores diferentes el consumo no necesariamente debería ser el mismo para los tres. Entonces se procede a revisar la placa característica de cada quemador, en la sección de anexos se muestra como evidencia las respectivas placas del quemador de cada horno, donde se encuentra que el horno 1 tiene un quemador Monarch Weishaupt WM-G20/2-A / ZM (W-F 50) con una capacidad de 2100 kW, en el caso del horno 2 se tiene un quemador

Power Flame C3-GO-20 con una capacidad de 4200 MBH lo que equivale a 1230.89 kW y para el caso del horno 3 se tiene un quemador Power Flame C4-G-30 de 7480 MBH que equivale a 2297.67 kW. Esto es un aspecto de mucha importancia, ya que el quemador del horno 2 es el más pequeño de los tres con una diferencia cercana al 55% por lo que se esperaría un menor consumo de GLP por tonelada para este horno, sin embargo, como se pudo corroborar anteriormente es en este horno donde se presenta un mayor consumo de GLP por tonelada producida. También, se debe considerar que en el horno 2 normalmente se procesan láminas de espesores más pequeños en comparación con los espesores de lámina procesados en el horno 1 y horno 3, por lo tanto, las toneladas producidas por el horno 2 serían menores debido al espesor de las láminas, sin embargo, este horno presenta una tendencia hacia un mayor consumo por cada tonelada mientras que los demás presentan una tendencia más constante o hacia la baja.

Finalmente, según lo analizado anteriormente se toma la decisión de enfocar las demás secciones del desarrollo de este proyecto en el horno 2, ya que, es uno de los sistemas electromecánicos de mayor impacto energético y presenta una tendencia de un comportamiento menos eficiente en comparación con los otros hornos.

15.Análisis de modos de fallo, efectos y criticidad.

Una vez definido el sistema electromecánico de interés, se procede a realizar el correspondiente estudio de los posibles fallos que podría llegar a presentar y también los causas y efectos de cada falla, se debe tomar en consideración que el horno puede ser dividido en tres subprocesos, como se explicaba en la sección anterior, dichos subprocesos son: el proceso de carga, el proceso de horneado y el proceso de descarga. Donde el proceso de carga y descarga son bastante similares, la principal diferencia está en la banda transportadora de rodillos que solo está presente en el proceso de descarga.

Para este apartado se utiliza como guía la norma IEC 60812-2018, donde se describen los lineamientos para el desarrollo de un AMFEC, para este proyecto en primera instancia se limita el análisis del AMFEC para el horno 2. Además, como lo indica la norma para sistemas grandes o complejos se recomienda subdividir el sistema en subsistemas, por tanto, el análisis del horno se descompone en los subsistemas de carga, horneado y descarga, así como en los componentes que conforman cada subsistema, esto con la intención de identificar potenciales fallas y las posibles afectaciones que puedan tener tanto en la producción como en el rendimiento energético del horno.

Siguiendo la recomendación la norma, para definir los modos de fallo de los equipos analizados en el horno, se utilizó la base de datos que posee la empresa con el historial de fallos reportados para el horno 2 en el 2021. De la base de datos se consideran los paros por problemas mecánicos y problemas eléctricos, ya que estos, son los que asume el departamento de mantenimiento y por tanto los que afectan sus indicadores.

De los reportes de falla del horno 2 se contabilizan 44 paros totales para el año 2021, sin embargo, muchos de estos reportes no eran lo suficientemente claros como para entender de que equipo o componente del horno se referían, por lo tanto, se realizó una revisión más minuciosa con las órdenes de trabajo y consultas realizadas al supervisor de mantenimiento preventivo Jermie Vargas y al supervisor de mantenimiento

mecánico Cristian Villalta, quienes conocen con más detalle los equipos y pueden brindar información más detallada; una vez teniendo claro los fallas reportadas se procede a agruparlas por equipo para facilitar el análisis, en la tabla A5 de la sección de anexos, se nuestra la cantidad de horas de paro totales, la cantidad de paros mecánicos, la cantidad de paros eléctricos y la cantidad de paros totales para cada uno de los equipos del horno 2 según los reportes de la base de datos.

Aprovechando los datos recolectados en la tabla A5 se realiza un diagrama de Pareto, que se muestra en la Figura 17, con la cantidad de horas para cada equipo, esto con la intención de mantener una idea clara de cuales equipos son los que están teniendo mayor impacto en lo relacionado a la disponibilidad del horno 2.

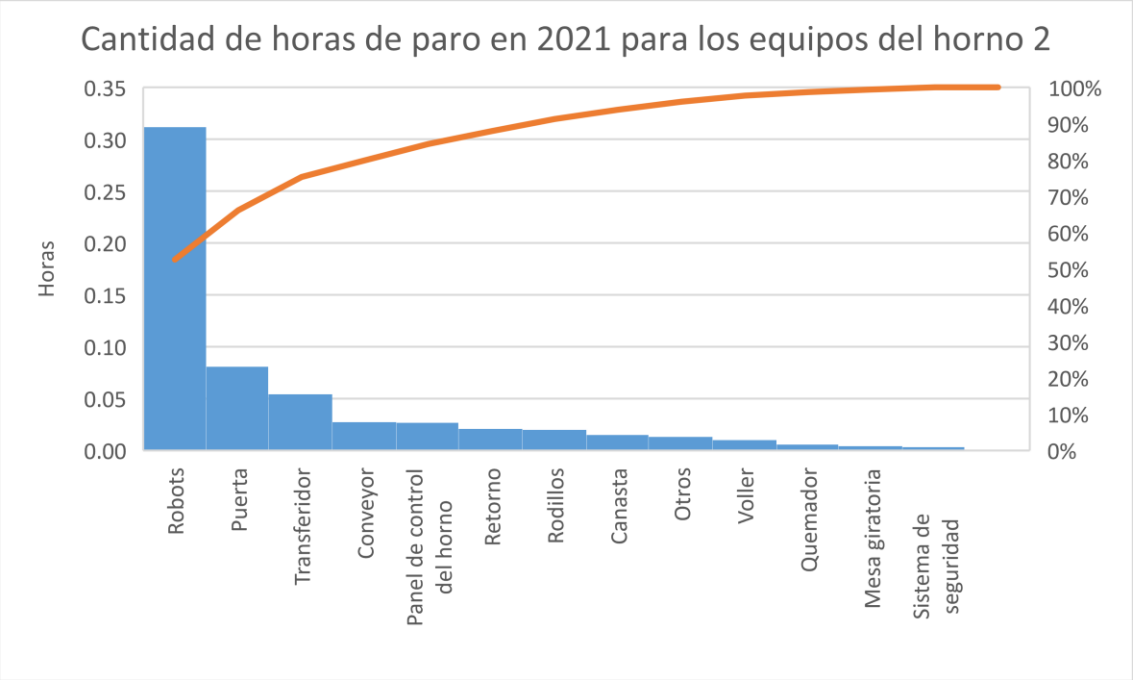


Figura 17. Equipos del horno 2 con mayor cantidad de horas de paro. Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo el principio de Pareto en la Figura 17, se pueden considerar los robots, la puerta y el transferidor como los equipos con mayor impacto en el tiempo de paro del horno, pero principalmente los robots presentan la mayor contribución en este rubro.

En este historial de fallos algunos de los principales equipos del horno no se incluyeron porque no había reporte de fallas para el año 2021, en estos casos se utilizó referencia bibliográfica de fallas comunes para poder incluirlas dentro del análisis y abarcar otros modos de falla importantes, como es el caso de los ventiladores axiales del horno donde los modos de falla presentados en el AMFEC se toman del manual de Soler y Paul (2016) donde se presentan algunas de las fallas más comunes para ventiladores industriales. También otro componente del horno que se incluyó en el análisis fue el aislamiento del horno, por su estrecha relación con el consumo energético del horno, para este caso se utilizaron los fallos más comunes descritos en la guía elaborada por Asociación de Fabricantes Españoles de Lanas Minerales Aislante (AFELMA) y Asociación Nacional de Instalaciones de Sistemas de Aislamiento Industrial (ANDIMAI) (2016).

Con la información anterior se procede a realizar el AMFEC, debido a la extensión del AMFEC, se muestra una porción del AMFEC en la tabla 12 para ejemplificar el análisis de realizado para las diferentes fallas consideradas, cabe aclarar que en la sección de anexos en la tabla A6 se muestra el AMFEC completo con los respectivos modos de falla y efecto detectados, además se utiliza el criterio del número de prioridad del riesgo (NPR) según lo recomendado en la Norma IEC 60812, para establecer los valores de severidad, ocurrencia y detección se consultó con el personal de mantenimiento de la empresa ya que ellos cuentas con una mejor noción de lo que conlleva cada falla de las descritas, cabe mencionar que para el criterio de la severidad no solo se consideró la afectación en la producción y estado de operación de la maquina también se considera el impacto energético que podría tener, ya que es un aspecto muy importante para los objetivos de este proyecto.

TABLA 12. PORCIÓN DE MUESTRA DEL ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA, EFECTO Y CRITICIDAD PARA EL HORNO 2.

Función del elemento			**Modo de fallo potencial**	**Efecto potencial del fallo**		**Causa o mecanismo potencial del fallo**	**Detalle de la causa o mecanismo potencial del fallo**	**Severidad**	**Ocurrencia**	**Detección**	**NPR**
Sub sistema	**Conjunto**	**Componente**		**Efecto local**	**Efecto final**						
Carga											
	Puerta										
		Cable	La puerta no sube	La puerta de la entrada al horno no sube lo que no permite que las canastas puedan entrar en el horno	Se ve afectada la producción en el horno, es imposible que las canastas entren en el horno	Se daña el cable	El cable que sujeta la puerta y la eleva se rompe y la puerta no se mueve.	8	8	1	64
	Voller										
		Pistón	Fuga de aceite	Perdida de presión en el pistón del voller	Se ve afectada la producción en el horno, ya que no se pueden mover canastas dentro del horno	Se daña la unión de la manguera con el pistón	La unión de la manguera con el pistón presenta fuga de aceite y afecta el funcionamiento del pistón	9	3	2	54
		Manguera hidráulica	Fuga de aceite	Perdida de presión en el pistón del voller	Se ve afectada la producción en el horno, ya que no se pueden mover canastas dentro del horno	Maguera hidráulica dañada	La manguera presenta fisura o rotura	9	3	2	54
		Sensor	El voller no realiza el recorrido necesario	El sistema de control del voller pierde la señal de posición y no realiza el movimiento requerido	Se ve afectada la producción en el horno, ya que no se pueden mover canastas dentro del horno	Sensor dañado	El sensor de posición se quiebra o presenta problemas con la señal	7	8	3	168

Analizando los resultados obtenidos tanto en la figura 17 como en la tabla A6 se escogen aquellos equipos del horno que puedan tener un impacto importante en la productividad o en el rendimiento energético del horno, por tanto, se seleccionan los robots, el quemador, el abanico principal y el aislamiento. Como se demostró según el registro de horas de paro los robots tienen el mayor tiempo de paro registrado esto puede influenciar en la eficiencia energética del horno, ya que mientras se atiende una falla no se cargan nuevas laminas en las canastas y el horno sigue consumiendo GLP, si la falla se alarga por mucho tiempo el horno se

debe apagar para no dañar el producto del interior o no desperdiciar más GLP, para el caso de los robots de la descarga el problema es similar, ya que al no poder descargar el horno el producto en el interior se podría dañar y si se tarda en reparar la falla se debe detener el horno. Por otra parte, el quemador, el abanico principal y el aislante se escogen principalmente por su influencia en el rendimiento energético del horno, de estos el aislante se considera como uno de los más problemáticos, ya que en la actualidad se detectaron secciones del horno con el aislamiento completamente deteriorado o con daños importantes.

Otro aspecto importante a considerar es si la falla reportada para un equipo se puede monitorear adecuadamente o si es muy complicada de monitorear, para el caso del robot las fallas reportadas en el driver o resistencias existe menos posibilidades para monitorear alguna variable, en relación con las bombas de vacío, las electroválvulas y las ventosas son elementos donde se podría considerar la medición de variables como el flujo de aire y la presión de trabajo las cuales podrían ser monitoreadas, sin embargo, según lo indicado por el personal de mantenimiento anteriormente existían medición en la presión de vacío pero se removieron los sensores por la gran cantidad de fallas que generaba el sensor al descalibrarse por la presencia de polvo, además, según lo explicado por el supervisor de mantenimiento mecánico, Cristian Villalta, cuando ocurre un fallo de este tipo no necesariamente ocurre un paro en la producción del horno, ya que algunas veces se tienen una o dos canastas cargadas esperando para entrar en el horno por lo que si el fallo es reparado antes de que esas canastas previamente cargadas entren en el horno entonces no existiría alteración en la producción y por consiguiente no afectaría la eficiencia del horno. Por otra parte, en el asilamiento se detectan variables como la temperatura interna, temperatura externa y temperatura ambiente como posibles parámetros para monitorear para evaluar la condición del aislante, en relación con la afectación a la productividad, según lo conversado con el Jefe de mantenimiento el señor Carlos Vindas, los problemas con el aislamiento afectan la temperatura interna del horno y esto puede generar problemas con la humedad que presentan las láminas en la salida del horno, donde el rango aceptable por criterios de calidad es de 4% a 8% de humedad, además,

el deterioro del material aislante afecta directamente en el consumo energético, esto es esperable según lo indicado por Cabrera y Baca (2016) donde se señala que la principal función del aislamiento es reducir el flujo de calor en una sección y de este modo ahorrar combustible y dinero, además se menciona la importancia medio ambiental al reducir la cantidad de combustible consumido y otro aspecto importante es la protección de equipos y personas que trabajan y/o circulan en las cercanías.

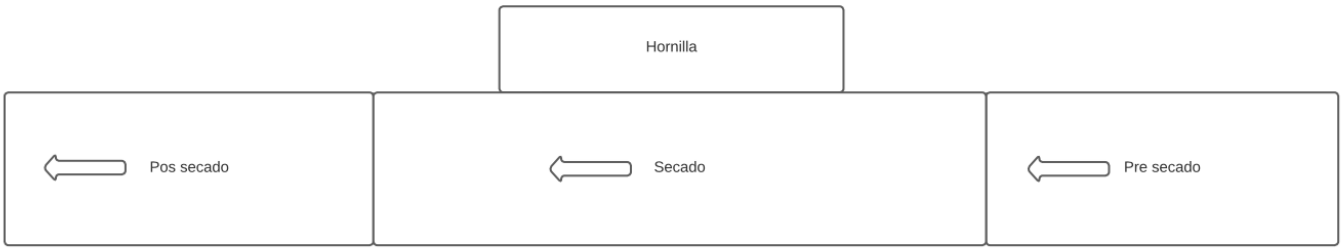


Figura 18. Diagrama de distribución de las secciones del horno. Fuente: elaboración propia.

Por lo expuesto anteriormente, se decide seleccionar el aislamiento para el desarrollo de una propuesta del monitoreo de la condición de este. Debido al tamaño del horno y que las condiciones de operación en relación con la temperatura y humedad varían dependiendo de la parte del horno que se analice, se planteara el monitoreo para solo una parte del horno, ya que el monitoreo de la totalidad del horno estaría fuera de los alcances para este proyecto en relación con el tiempo, entonces, se realiza otro AMFEC limitado a las paredes aisladas del horno con la intención de definir qué sector del horno a monitorear y las posibles fallas, debido a la extensión del documento en la tabla 13 se muestra una porción del AMFEC realizado para el aislamiento para ejemplificar como se realizó el análisis, en la tabla A7 en la sección de anexos se puede apreciar el AMFEC completo, para el desarrollo del AMFEC de los aislamientos se consideran los parámetros de operación a los que están expuestos los aislantes en cada sección del horno, ya que estos parámetros pueden variar dependiendo de cada sección, en la tabla 14 se muestran los parámetros que se observaron en una revisión realizada, cabe aclarar que para el caso de la hornilla la temperatura de operación interna varía

dependiendo de la temperatura requerida en las demás cámaras del horno, pero se establece una temperatura máxima de 350 °C por temas de seguridad, además, es importante aclarar que la temperatura de las cámaras de pre - secado, secado y post - secado puede variar de un costado a otro dependiendo del sentido del flujo de aire caliente. Además, en la figura 18 se puede apreciar la ubicación de cada una de estas secciones del horno 2.

TABLA 13. PORCIÓN DEL ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA, EFECTO Y CRITICIDAD DE LOS AISLAMIENTOS.

Función del elemento			**Modo de fallo potencial**	**Efecto potencial del fallo**		**Causa o mecanismo potencial del fallo**	**Detalle de la causa o mecanismo potencial del fallo**	**Severidad**	**Ocurrencia**	**Detección**	**NPR**
Subsistema	**Conjunto**	**Componente**		**Efecto local**	**Efecto final**						
Aislamiento de la hornilla											
	Paredes aislantes	Fibra aislante	Paredes externas aumentan de temperatura	Mayor pérdida de calor del horno	La temperatura interna del horno se ve afectada, también aumenta el consumo de GLP	Degradación de la fibra aislante	Por el tiempo de uso	9	4	5	180
		Fibra aislante	Paredes externas aumentan de temperatura	Mayor pérdida de calor del horno	La temperatura interna del horno se ve afectada, también aumenta el consumo de GLP	Empapado del aislamiento y aceleración de la degradación de la fibra aislante	Humedad entrando en contacto con la fibra aislante	8	3	5	120
		Fibra aislante	Paredes externas aumentan de temperatura	Mayor pérdida de calor del horno	La temperatura interna del horno se ve afectada, también aumenta el consumo de GLP	Degradación de la fibra aislante	Golpes o abolladuras en las paredes	9	2	5	90

TABLA 14. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO PARA EL ASILANTE DEL HORNO 2.

Sector del horno	**Temperatura programada**	**Temperatura medida**	**Humedad medida**
Hornilla	<350°C	250°C	--
Pre - secado	50°C	50°C	61%
Secado	85°C - 95°C	79°C[Este]-86°C[Oeste]	26%
Post - secado	90°C	101°C[Este]-106°C[Oeste]	0%

Basándose en lo anterior se plantea desarrollar el monitoreo para evaluar la condición del aislante de la hornilla, ya que en esta se genera el aire caliente y se distribuye a las demás cámaras del horno, por lo tanto, un problema en la hornilla puede llegar a afectar a las demás partes del horno, además, presenta las temperaturas más altas dentro del horno lo que provoca una mayor tendencia al flujo de calor hacia el exterior.

Las variables por considerar para monitorear la condición del aislante de la hornilla serían la temperatura interna, la temperatura externa, la temperatura ambiente y el consumo GLP este último para poder correlacionar el mantenimiento basado en la condición con el rendimiento energético del horno. La medición de la temperatura interna, externa y ambiente se consideran como parámetros del monitoreo, ya que, según lo estudiado en la guía presentada por AFELMA y ANDIMAI (2016) y lo expuesto por Çengel y Ghajar (2011) para poder obtener tanto la transferencia de calor a través de las paredes como para evaluar el coeficiente de conductividad térmica se requiere de estos parámetros. También es importante recordar que para poder relacionar el monitoreo de la condición con el rendimiento energético del horno se debe incorporar un parámetro energético, en este caso se toma como parámetro la medición del consumo de GLP que ya se instaló en la compañía.

16.Monitoreo de condición en tiempo real

16.1. Descripción general y arquitectura del sistema.

Una vez establecidos el componente y los parámetros de funcionamiento, se procede a proponer el sistema de obtención y almacenamiento de datos, para los efectos de este proyecto se planteará una simulación del sistema para esto se utilizará el software LabVIEW el cual ha sido utilizado para este tipo de simulaciones como la desarrollada por Marín (2020). Este software está dotado de herramientas lo suficiente mente robustas para lo requerido en el desarrollo de este proyecto, este software cuenta con un sistema de programación por bloques lo cual facilita en gran medida el planteamiento de un posible sistema de monitoreo. La implementación de sistema de monitoreo a escala industrial o la implementación de un prototipo del sistema en físico no es parte del alcance del proyecto.

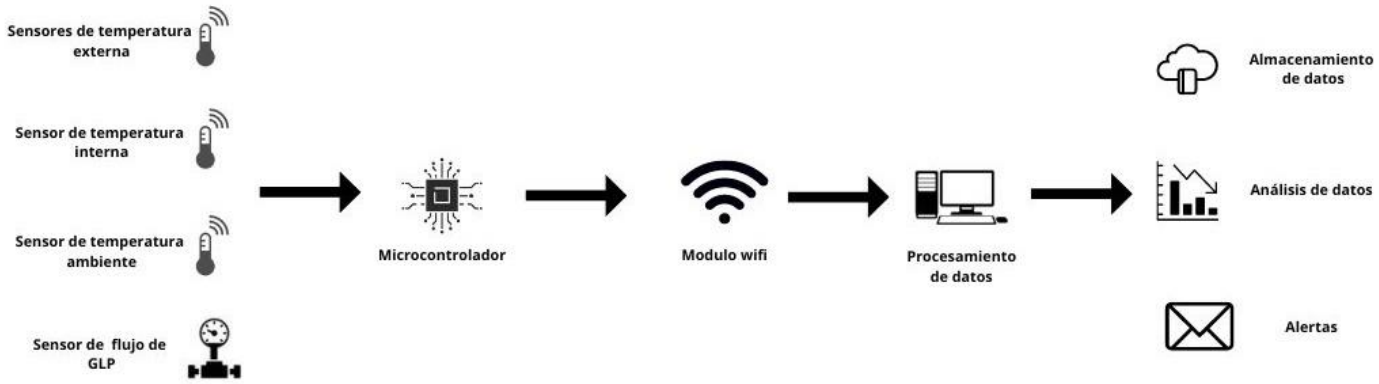


Figura 19. Arquitectura del monitoreo de la condicion en tiempo real propuesto. Fuente: Elaboración propia.

Describiendo de manera general el posible monitoreo de la condición en tiempo real y como se puede apreciar en la Figura 19, estaría compuesto por diversos sensores de temperatura ubicados en puntos de interés de la hornilla, en primer lugar se requiere medir la temperatura interna de la hornilla para esto se utilizará la señal del sensor que la empresa tiene instalado, también se requiere medir la temperatura externa de las paredes de la hornilla para esto se prone utilizar 4 sensores de temperatura por cada pared (incluyendo el

techo) distribuidos adecuadamente en cada pared; además, se propone utilizar un sensor para monitorear la temperatura ambiente y finalmente se utilizara la señal de la medición del consumo de GLP del horno esto para poder establecer la relación del deterioro del aislamiento con el rendimiento energético del horno. Las señales de estos sensores deben ser conectadas a un microcontrolador el cual se encargará de interpretar estas señales y mediante un módulo wifi enviar la información hacia un ordenador.

Lo anterior describe de manera general el proceso de adquisición de los datos, por otro lado, cuando los datos ingresan al ordenador el sistema procede a realizar los cálculos y análisis correspondientes, el sistema debe obtener los valores de perdida de calor para cada pared, además, calcular el coeficiente de conductividad térmica que este reportando en ese momento en específico, finalmente comparar las pérdidas totales para las paredes de la hornilla con el consumo de GLP del horno y generar las alertas correspondientes cuando se alcancen valores no deseados. Toda la información anterior se almacena para que pueda ser observada y manipulada por el usuario en cualquier momento y puedan realizarse análisis de datos que se deseen.

En relación con las alertas, el sistema debe generar un correo electrónico indicando que alguno de los parámetros calculados esta fuera de los rangos establecidos como normales para la operación, de esta manera se busca que el personal de mantenimiento pueda tomar decisiones con suficiente antelación y más eficientemente. Para esto se propone establecer valores de consumo de GLP y perdidas de calor para toda la hornilla donde el usuario pueda establecer los rangos deseados y que se genere la alerta cuando se supere este valor, además, se generará alerta cuando el coeficiente de conductividad térmica de alguna pared supere el valor máximo establecido por el usuario.

Uno de los aspectos más relevantes de lo planteado anteriormente, es la relación que se establece entre los parámetros monitoreados, como lo son las temperaturas para evaluar la condición real del aislamiento térmico, con el rendimiento energético del horno y como a través del monitoreo se podría observar el efecto que tendría

una acción de mantenimiento inadecuada o tardía sobre la productividad y la condición del horno, pero también sobre el rendimiento energético del mismo.

16.2. Equipos para el monitoreo de la condición.

A pesar de que en este proyecto no se desarrollará el prototipo en físico, si se proponen algunos equipos que se pueden considerar en una posible aplicación futura del mismo de manera que se pueda corroborar el funcionamiento de lo planteado para el monitoreo de la condición del aislamiento mediante un prototipo de bajo costo, para esto se toma como referencia algunas propuestas realizadas en sistemas similares a lo propuesto en este proyecto como es el caso de la investigaciones de Marín (2020) y Alfaro (2020).

A manera de resumen, en la tabla A8 se muestran los equipos que se requiere adquirir para un posible prototipo del sistema de monitoreado planteado, donde se puede apreciar el modelo y aplicación de cada uno de ellos, como lo son los sensores de temperatura para la superficie externa de las paredes y la temperatura ambiente, como se aclaró anteriormente no es necesario adquirir sensores para la medición en la pared interna y el consumo de GLP ya que la empresa cuenta con estos equipos ya instalados.

También se presenta el microcontrolador propuesto el Arduino Mega 2560 R3 en el cual se conectan los sensores, sin embargo, la cantidad de entradas de este microcontrolador no es suficiente para la cantidad de sensores que se deben conectar por lo que se propone utilizar un multiplexor Cd4051BE el cual permite incrementar la cantidad de sensores que se pueden conectar. Además, se propone el módulo wifi ESP8266 que se encargará del envió de datos hacia el ordenar a través de internet.

Finalmente, se propone utilizar un encapsulado acrílico para proteger el microcontrolador de agentes que lo puedan dañar, también se propone el uso de una protoboard y cables eléctricos para la conexión entre los sensores y los demás equipos del posible sistema de monitoreo.

16.3. Adquisición de la información y cálculo de pérdidas de calor en las paredes.

Como se mencionaba en el capítulo anterior, el planteamiento del prototipo para monitorear la condición será establecido para cinco secciones de la hornilla las cuales son: El techo y cuatro paredes laterales (Pared norte, Pared Sur, Pared este y Pared oeste), ya que representan una de las secciones más críticas para la organización, con esto se pretende establecer un precedente del procedimiento a seguir para una posible aplicación en el resto de paredes del horno, en la figura 20 se muestra un diagrama que ejemplifica la distribución de los sensores.

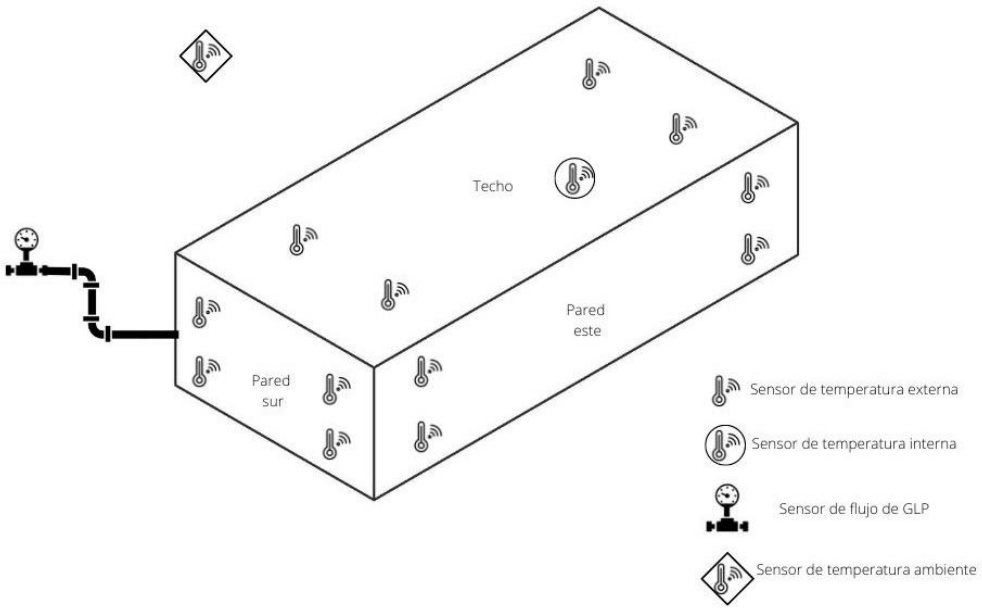


Figura 20. Diagrama descriptivo de la hornilla y ubicación de sensores. Fuente: elaboración propia.

Para establecer el valor de la temperatura externa del horno se realiza un promedio de las cuatro mediciones de cada sensor ya que se requiere un único valor de temperatura para aplicar las fórmulas de transferencia de calor, esto haciendo una analogía a lo planteado por Burbano y Fonseca (2007), donde se realiza una medición de la temperatura interna de la pared de un recinto mediante cuatro termocuplas de contacto y se calcula la temperatura promedio de estas mediciones como el parámetro a utilizar. Además,

también NRGY solutions (2020) en su página web recomienda tomar mediciones en varios puntos de la pared externa y considerar un promedio para realizar los cálculos respectivos a transferencia de calor para las evaluaciones de cambios de aislamiento. Para el prototipo se recomienda utilizar un sensor LM35 que tiene un rango de operación de hasta 150°C, los valores típicos de este parámetros no están definidos por parte del departamento de mantenimiento, ya que comúnmente no se realizan mediciones de la temperatura externa, para poder tener una idea de las temperaturas que pueden registrar las paredes externas se realizaron mediciones en diferentes puntos de la pared utilizando un termómetro infrarrojo y se observaron temperaturas entre 58°C a 120°C. Este mismo sensor se utilizará para la medición de la temperatura ambiente la cual influye directamente en los cálculos de transferencia de calor y es por esto que se propone una medición real para mayor precisión de los resultados, la temperatura ambiente en Paraíso de Cartago según el sitio web Weather Spark (2022) alcanza más de 25°C en la época más calurosa y 16°C en los meses más fríos.

En relación con la temperatura interna del horno, se utilizará la medición de la termocupla ya instalada por la empresa, actualmente las mediciones de este sensor no se almacenan por lo que no es posible establecer valores típicos a partir de algún registro histórico, sin embargo, según lo conversado con el personal de mantenimiento a este parámetro solo se le establece una temperatura máxima de 350°C por seguridad y la temperatura se regula según las temperaturas requeridas en las cámaras inferiores del horno, en las visitas hechas al cuarto de control del horno se observaron temperaturas de 245°C a 260°C.

Con respecto a la medición de GLP, se realiza mediante un sensor de flujo instalado por la empresa como parte de la certificación de ISO 50001, este es un flujómetro de la marca FOX THERMAL y de modelo FT1-06IDDP1, estas mediciones son actualmente llevadas a un PLC donde se convierten a litros de GLP y se almacenan localmente con una frecuencia de 2 minutos entre cada dato, se estableció a partir de los registros histórico proporcionados por la empresa, de los meses de marzo y abril del 2022, el promedio de consumo diario obteniéndose aproximadamente un consumo diario de 4850 litros de GLP por día.

Con base a lo anterior, se procede a definir las ecuaciones y demás consideraciones a tomar en cuenta para que el sistema planteado a través de la simulación tenga la capacidad de generar los datos de transferencia de calor a través de las paredes y del coeficiente de conductividad térmica de cada pared. Para esto es necesario establecer la transferencia de calor a través de las paredes, según lo explicado por Çengel y Ghajar (2011) la transferencia de calor en una pared en estado estacionario desde el interior de la pared hacia el ambiente se puede modelar mediante el concepto de las resistencias térmicas, para esto es necesario identificar los modos de transferencia de calor presentes, para este caso se define transferencia de calor por conducción desde el interior de la hornilla hasta la pared externa y trasferencia de calor por convección y radiación desde la pared externa hasta el ambiente. Del modelo explicado por los autores se deduce que el flujo de calor proveniente de la pared interior hasta la pared exterior es equivalente a la transferencia de calor de la pared externa hacia el ambiente, según la primera ley de la termodinámica, por lo tanto, conociendo este último se puede calcular el coeficiente de conductividad térmica real de la pared, lo anterior lo exponen también AFELMA y ANDIMAI (2016) mediante la Figura 21.

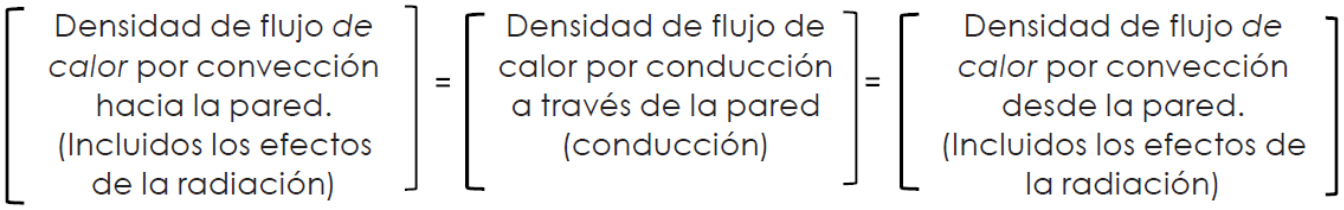


Figura 21. Relaciones de la transferencia de calor según el concepto de resistencias térmicas. Fuente: AFELMA y ANDIMAI (2016).

La transferencia de calor desde la pared externa hacia el ambiente se modela según el diagrama presentado por Çengel y Ghajar (2011) en la Figura 22.

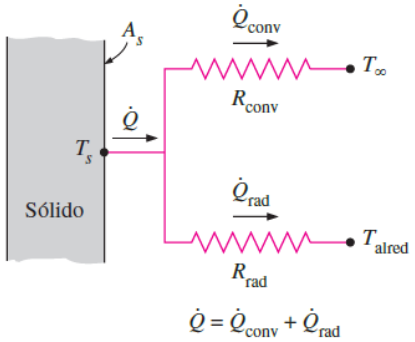


Figura 22. Modelo de resistencias térmicas para la transferencia de calor desde la pared al ambiente. Fuente: Çengel y Ghajar (2011).

Lo expuesto anteriormente, se reduce a encontrar la transferencia por convección y radiación, para esto los autores exponen las ecuaciones necesarias para obtener estas cantidades.

Para el caso de la transferencia de calor por radiación, se requiere obtener en primera instancia el coeficiente de transferencia de calor por radiación esto se logra a partir de la ecuación 1.

$$h_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^2 + T_{alred}^2)(T_S + T_{alred})$$

Ecuación 1. Coeficiente de transferencia de calor por radiación.

Donde σ=5.6704x10^{-8} W/m^2 K^4 es la constante de Stefan-Boltzmann y ε es la emisividad que para el caso de las paredes de la hornilla que tienen un recubrimiento de aluminio se considera la emisividad del aluminio sin oxido de 0.03. TESTO (s. f.). Una vez obtenido lo anterior se puede calcular la transferencia de calor según la ecuación 2.

$$\dot{Q}_{rad} = h_{rad}A(T_S - T_{alred})$$

Ecuación 2. Transferencia de calor por radiación.

Por otra parte, para el caso de la convección lo primero es calcular tanto la temperatura de película mostrado en la ecuación 3 y el coeficiente de expansión volumétrica mostrado en la ecuación 4, es importante aclarar que se considera solamente convección natural, ya que el horno está en un lugar bajo techo donde

tanto al norte como al sur existen edificios o almacenes, hacia los costados se ubican otras máquinas del proceso productivo como los otros hornos y los equipos de la línea de la escuadradora y línea de maquinados, por tanto, no se aprecian corrientes de viento como para considerar la transferencia por convección forzada, por tanto, solo se considera la convección natural.

$$T_f = \frac{T_S + T_{alred}}{2}$$

Ecuación 3. Temperatura de película.

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

Ecuación 4. Coeficiente de expansión volumétrica

Posterior a esto se calcula el número de Rayleigh según la ecuación 5, tomando la longitud característica (Lc) de la Figura A6 mostrada en la sección de anexos, la longitud característica para una pared vertical corresponde a la altura de la pared y para el caso de una pared horizontal corresponde a el área superficial de la pared dividido entre el perímetro. Por otra parte, tanto Pr como *v* se toman de la Figura A7 de la sección de anexos, obtenidas de Çengel y Ghajar (2011).

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_S - T_{alred})L_c^3}{v^2} P_r$$

Ecuación 5. Numero de Rayleigh.

Una vez obtenidos los resultados anteriores, se calcula el número de Nusselt con base en la información mostrada en la Figura A6, por tanto, para las paredes laterales de la hornilla se utiliza la ecuación 6 y para el techo de la hornilla se utiliza la ecuación 7.

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (\frac{0.492}{P_r})^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2$$

Ecuación 6. Numero de Nusselt para pared vertical

$$Nu = 0.15 Ra_L^{1/3}$$

Ecuación 7. Numero de Nusselt para pared horizontal.

Con lo anterior se puede obtener el coeficiente de transferencia de calor por convección, utilizando la ecuación 8, el valor de conductividad térmica del aire se obtiene de la Figura A7.

$$h = \frac{Nuk}{Lc}$$

Ecuación 8. Coeficiente de transferencia de calor por convección.

Finalmente se calcula la transferencia de calor por convección según la ecuación 9.

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_S - T_{alred})$$

Ecuación 9. Transferencia de calor por convección.

Una vez obtenida la transferencia de calor tanto por convección como por radiación se calcula la transferencia de calor total o combinada con la ecuación 10.

$$\dot{Q}_{combinado} = \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{conv}$$

Ecuación 10. Transferencia de calor total desde la pared al ambiente.

El resultado que se obtendría de la ecuación anterior es de mucha importancia, ya que esto representaría no solo las pérdidas de calor a través de la pared, también es posible obtener el coeficiente de conductividad térmica de la pared, ya que como se explicó anteriormente, la transferencia de calor combinada desde la pared

externa al ambiente debe ser la misma transferencia desde el interior del horno hasta la pared externa, en la ecuación 11 se muestra cómo se calcula el coeficiente.

$$k = \frac{(L)\dot{Q}_{cond.pared}}{A(T_{int} - T_{ext})}$$

Ecuación 11. Coeficiente de conductividad térmica.

El obtener este coeficiente es de vital importancia, ya que es un parámetro de la condición real de la fibra aislante, por lo que un deterioro en el aislamiento se traduciría en un aumento en el valor de este coeficiente, estos comportamientos los estudia Kan, et al., (2022) en su investigación para paneles aislantes de vacío, a pesar de ser una tecnología diferente al tipo de aislamiento utilizado en la hornilla, el autor aclara que con el paso del tiempo y el deterioro del aislante la conductividad térmica comienza a aumentar, el rendimiento del aislamiento y la vida útil disminuye, además, identifica a la humedad y las altas temperaturas como factores que pueden acelerar el envejecimiento del aislante.

Según indican Cabrera y Baca (2016) el aislamiento térmico tiene como función retardar el flujo de calor a través del material por lo que según los autores se utilizan materiales con conductividades térmicas relativamente bajas para tratar de lograr este objetivo, lo anterior es esperable si se contrasta con lo indicado por Çengel y Ghajar (2011) donde se dice que una alta conductividad térmica es sinónimo de un material que es buen conductor de calor y una baja conductividad térmica se puede interpretar como un material que es mal conductor de calor. Contrastando lo anterior con lo indicado por Kan, et al., (2022) si al material degradarse aumenta su conductividad térmica esto se traduciría en un material con mayor capacidad de conducir el calor y por lo tanto el aislante pierde parte de su capacidad en retardar el flujo de calor. Por lo tanto, el poder medir la conductividad térmica real del material puede reflejar una condición de salud del mismo, ya que según Montero, et al., (2020) a partir de la medición y almacenamiento de datos se pueden utilizar diversos modelos que permiten determinar tanto la condición actual como la esperada para un equipo,

por consiguiente, se propone como un indicador de salud del aislamiento el medir a lo largo del tiempo el comportamiento la conductividad térmica del aislante, de manera que en una gráfica se pueda apreciar la variación que tiene su comportamiento en el tiempo de manera que el departamento de mantenimiento tenga una herramienta que pueda ayudar a la toma de decisiones.

A manera de resumen de lo presentado anteriormente, para poder obtener el índice de salud propuesto para el aislamiento térmico, el sistema propuesto deberá obtener a partir de sensores de temperatura la temperatura externa promedio, la temperatura ambiente y la temperatura interna de la hornilla con estos datos de entrada el sistema debe obtener las propiedades del aire para la temperatura de película medida y posterior a esto se deben modelar las ecuaciones descritas anteriormente para obtener la transferencia de calor por radiación y por convección, tomando en consideración las variables necesarias para el cálculo como lo son el número de Rayleigh y número de Nusselt. Una vez el sistema obtenga la transferencia de calor de radiación y convección deberá sumarlas y calcular el coeficiente de conductividad térmica de la pared para la condición real del aislante, esta información deberá ser almacenada y mostrada mediante graficas para facilitar el análisis al personal de mantenimiento.

Una vez definidas las ecuaciones y constantes que deben tomarse en cuenta para lograr los resultados requeridos, se proceden a desarrollar la simulación siguiendo el proceso propuesto anteriormente, para esto se realiza un código individualizado para cada una de las paredes, ya que, es muy poco probable que los parámetros de temperatura de cada pared coincidan siempre, por cuestiones de extensión de este documento se explicara en detalle solamente el código de una de las paredes, los demás se pueden encontrar en la sección de anexos. Por tanto, se escoge la pared oeste como ejemplo, en primera instancia en la Figura 23 se muestra el código de la recepción de los datos y la definición de algunas variables necesarias en el resto de la programación, para este caso las bloques nombrados como T. ex oeste 1, T. ex oeste 2, T. ex oeste 3, T. ex oeste 4 representan las señales de los cuatro sensores de temperatura externa, de lo cual el sistema calcula la

temperatura externa promedio para dicha pared, por otra parte, los bloques nombrados como Temperatura interna y Temperatura externa representan la señal de los sensores correspondientes a dichos parámetros. Las variables definidas en esta etapa son la temperatura de película y los diferenciales de temperatura mostrados.

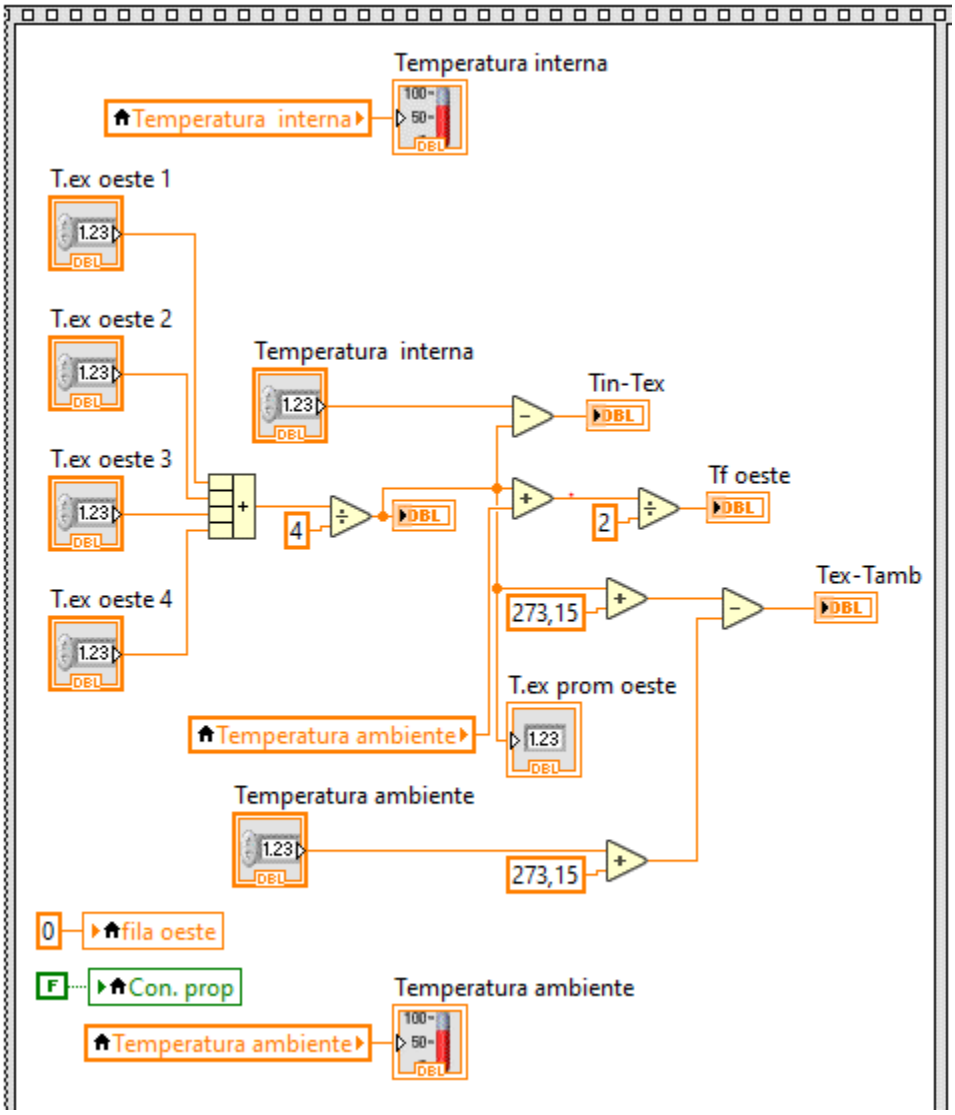


Figura 23. Diagrama de bloques recepción de datos de pared oeste. Fuente: Elaboración propia.

Como se pudo observar en la explicación de las ecuaciones de transferencia de calor, se debe considerar la variación de las propiedades del aire según la temperatura de película, para esto se programó el sistema para que pueda obtener una tabla con los valores de las propiedades del aire, este código se muestra en la

Figura 24, una vez que el sistema obtiene la tabla procede a obtener el rango de valores y se realiza la correspondiente interpolación para obtener el número de Prandtl, la conductividad térmica del aire y la viscosidad cinemática del aire, el código para esto se muestra en la Figura 25.

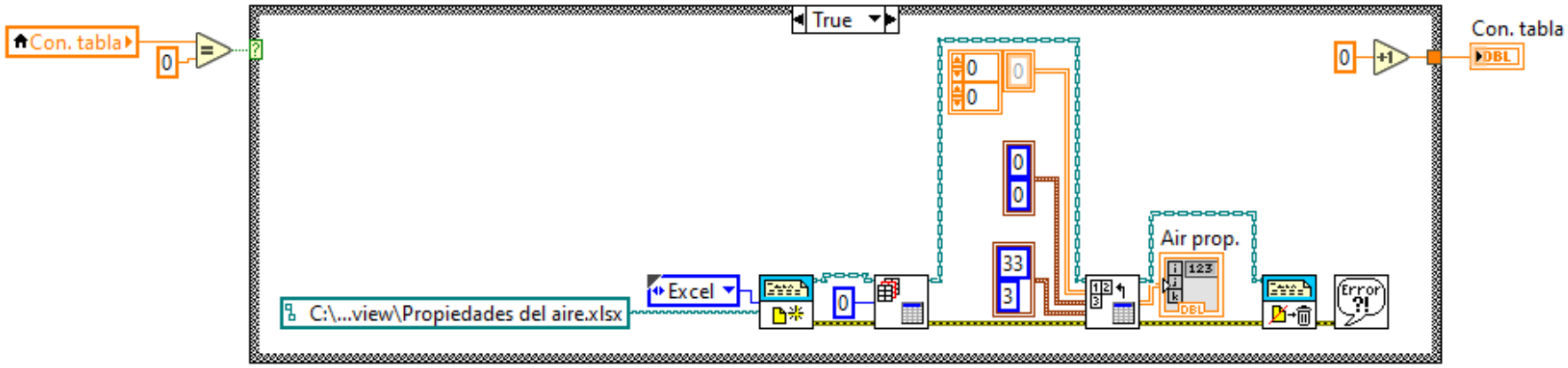


Figura 24. Diagrama de bloques obtención de la tabla con los datos de las propiedades del aire. Fuente: Elaboración propia.

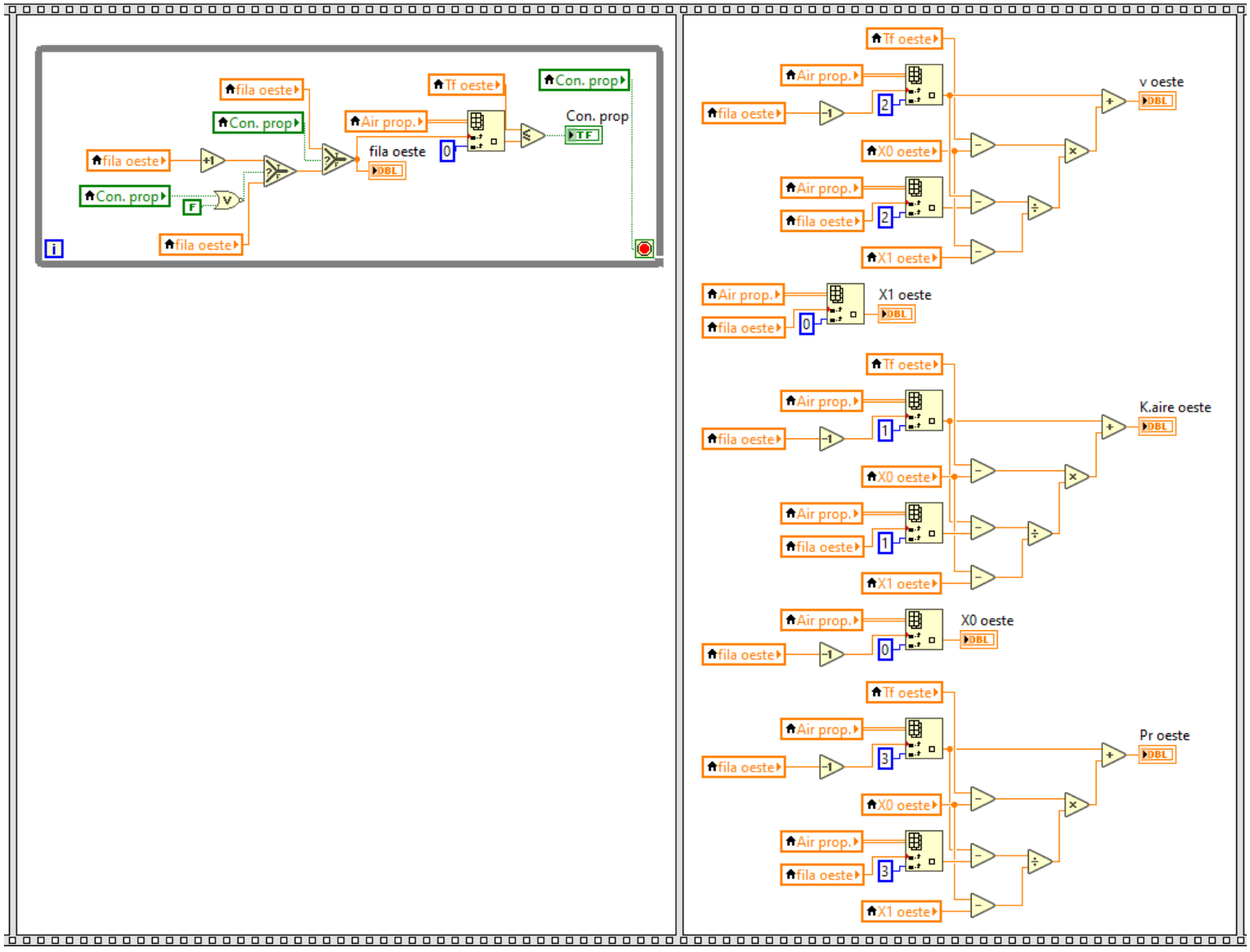


Figura 25. Diagrama de bloques de la obtención de los valores de las propiedades del aire. Fuente: Elaboración propia.

Una vez el programa obtiene todos los datos necesarios, procede a calcular la transferencia de calor a través de la pared, así como el correspondiente coeficiente de conductividad térmica, para esto se realiza el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 26.

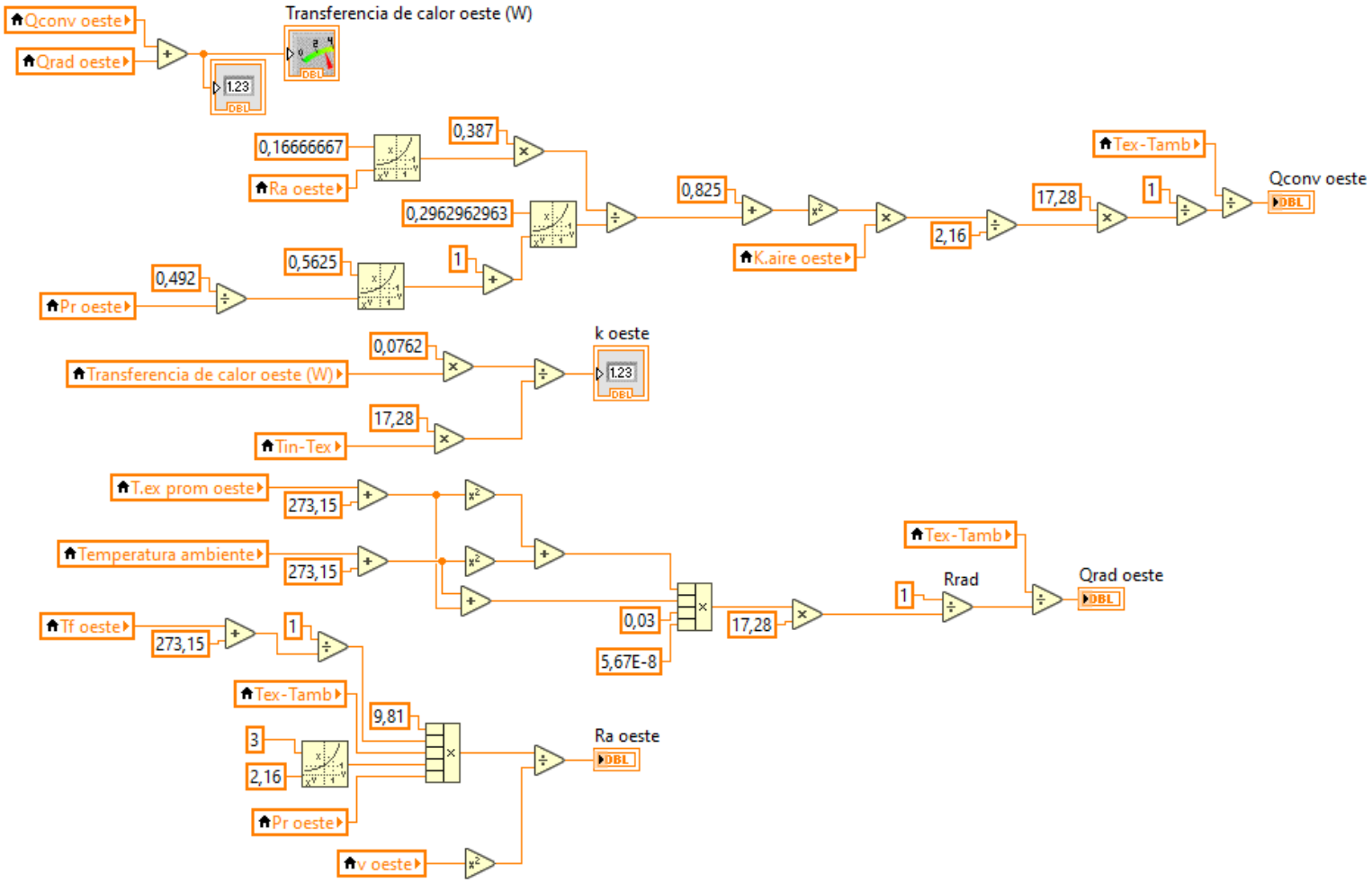


Figura 26. Diagrama de bloques del cálculo de la transferencia de calor y coeficiente de conductividad. Fuente: Elaboración propia.

Otra parte importante del sistema es generar alertas en el momento que algún parámetro de conductividad térmica supera el umbral de funcionamiento normal, para esta sección se optó por permitirle al usuario definir cual ese umbral deseado, ya que actualmente no existe registro histórico de estos datos y la empresa actualmente no tiene claro un valor preciso para estos umbrales, además, el umbral en este caso depende de la eficiencia energética por concepto de pérdidas de calor a través del aislamiento que la empresa esté dispuesta a asumir, por tanto, se requiere en primera instancia medir para poder tener un histórico de los valores del coeficiente de conductividad térmica para poder aproximar los umbrales para generar la alerta. Para efectos de la simulación se estableció un valor de 0,12 W/mK como umbral para el coeficiente de conductividad, este correspondiente a los resultados de la simulación para una temperatura externa promedio de 80°C, el código para la generación de la alerta se puede observar en la Figura 27. Además de alertar en la pantalla del programa la presencia de un valor muy elevado de la conductividad térmica, el programa tiene la capacidad de enviar un correo electrónico a la persona encargada donde se especifica la pared y las posibles causas de un registro alto para dicho parámetro esto con la intención de facilitarle al personal de mantenimiento el conocer el posible problema, ya que es poco probable que siempre se encuentre una persona frente al ordenador para poder notar la alerta, lo que agiliza la identificación de problemas en el aislamiento sin la necesidad de realizar mediciones en campo y sin tener que estar pendiente de las mediciones del monitoreo constantemente, además, cabe resaltar que el sistema tiene la capacidad de establecer las direcciones de correo electrónico sin la necesidad de modificar los diagramas de bloques.

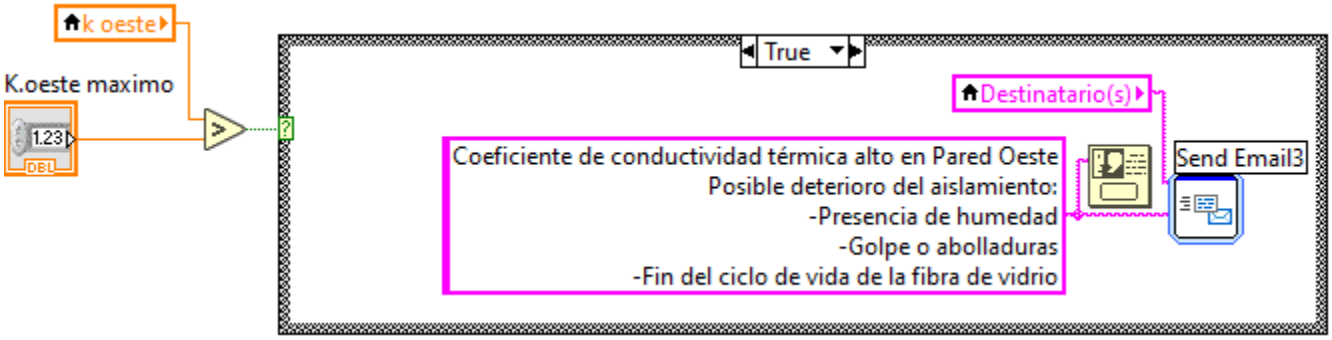


Figura 27. Diagrama de bloques para la generación de alertas por el deterioro del aislamiento Fuente: Elaboración propia.

Las variables más importancia de lo descrito anteriormente, se pueden visualizar a través de la interfaz creada para el programa, donde se puede apreciar la medición de los sensores y los correspondientes valores de pérdidas de calor a través de la pared y el coeficiente de conductividad térmica junto con la gráfica correspondiente para poder visualizar el comportamiento en el tiempo de dicho parámetro. Esta interfaz se puede observar en la Figura 28 donde también se muestra la alerta que se generaría si el coeficiente de conductividad supera el valor máximo establecido.

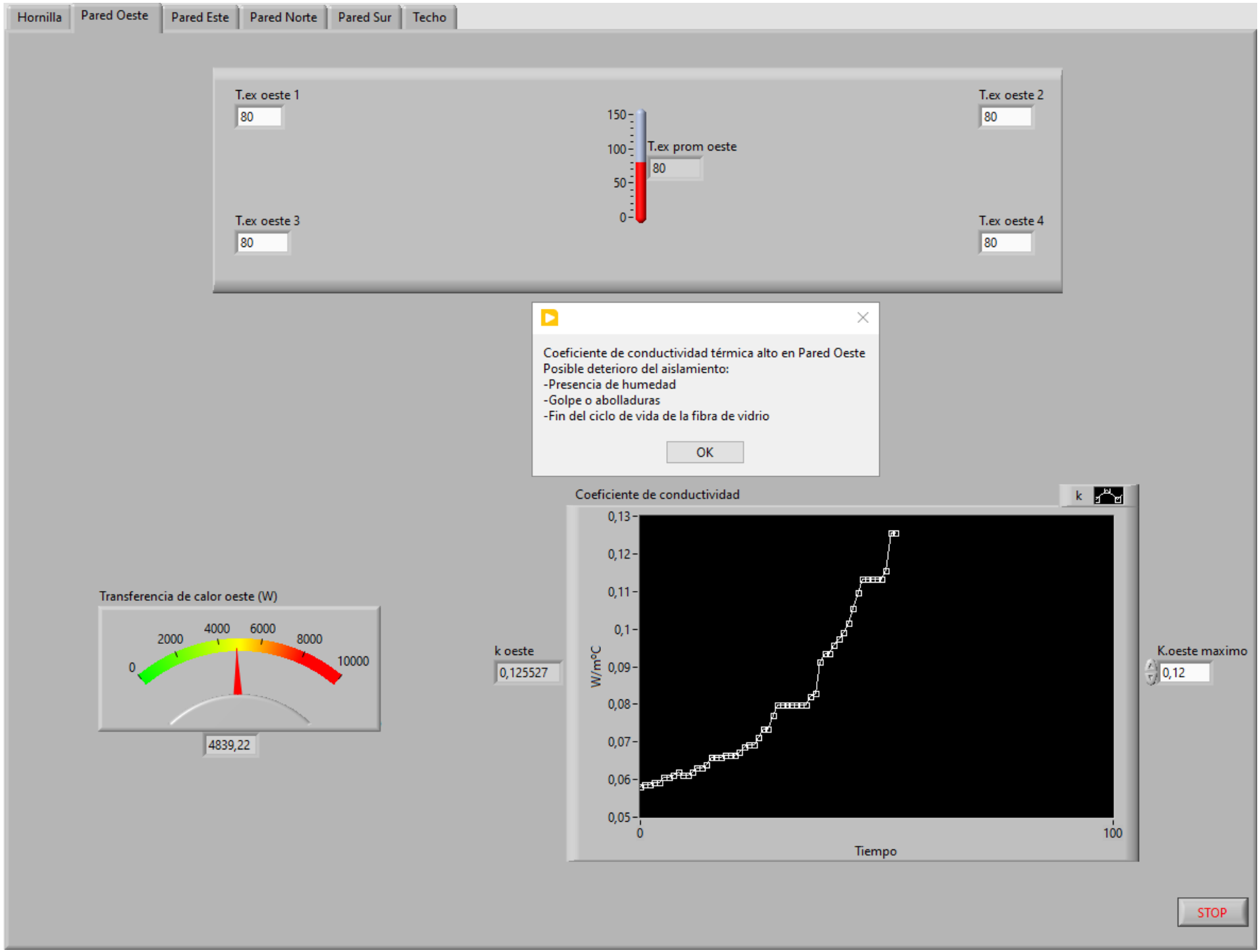


Figura 28. Interfaz de monitoreo para la pared oeste de la hornilla. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la gráfica de la interfaz mostrada en la en la Figura 28,el sistema generará la alerta hasta que se supere el umbral máximo establecido, una vez que el coeficiente de conductividad térmica vuelva a estar en el rango de valores establecido entonces el sistema continua realizando las mediciones con normalidad, además, se puede apreciar la señal de los cuatro sensores de temperatura de la pared junto con la temperatura externa promedio, además, del indicador de pérdidas de calor para esta pared en específico. Como se mencionaba anteriormente la alerta se envía también por correo electrónico en la Figura 29 se puede apreciar el correo electrónico enviado por el programa con los detalles del problema detectado a través del monitoreo de los parámetros.

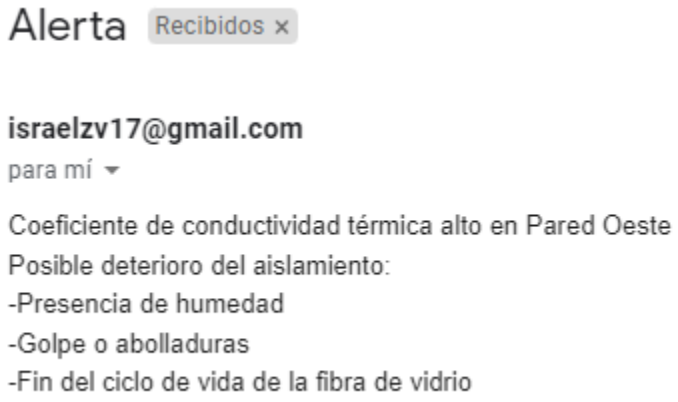


Figura 29. Alerta de correo electrónico de la pared oeste. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, las mediciones hechas por el sistema son almacenadas para su futuro análisis, el sistema se adoptó para realizar la medición en cierto periodo de tiempo según lo requerido por el usuario, al ser un parámetro que tiende a degradarse en periodos de tiempo relativamente amplios, no es necesario realizar mediciones tan seguidas, por lo que se proponen mediciones cada 24 horas para el registro de los datos y la gráfica, sin embargo, esto solo aplica para el almacenamiento de los datos y las gráficas, para cualquier variación se podrá apreciar en la interfaz, pero al ser parámetros con un comportamiento tan constante en el tiempo es poco probable notar cambios abruptos en periodos cortos de tiempo. El diagrama de bloques realizado para el almacenamiento de los datos de la pared oeste se puede apreciar en la Figura 30.

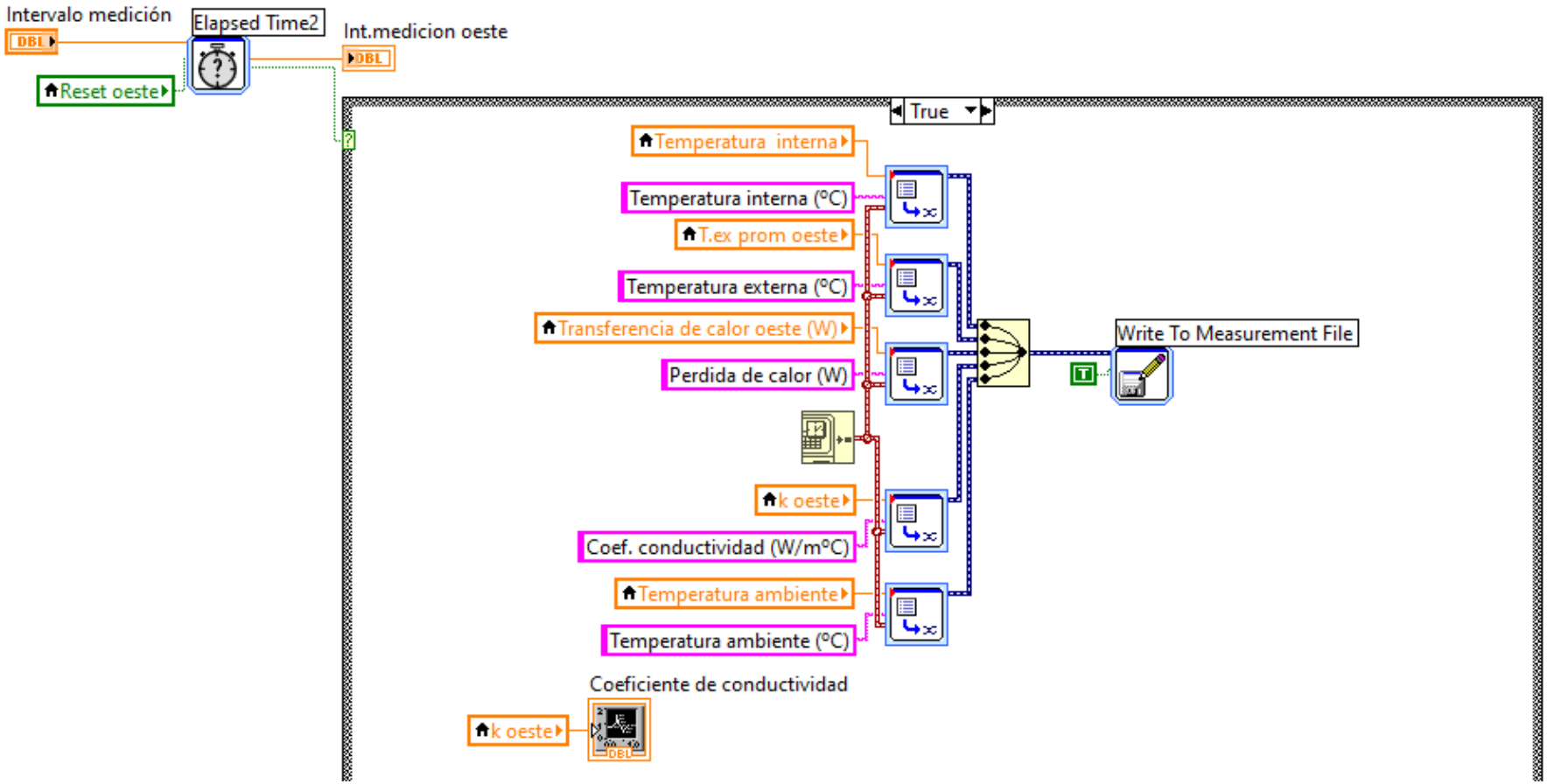


Figura 30. Diagrama de bloques para el almacenamiento de los datos de la pared oeste. Fuente: Elaboración propia.

A partir del diagrama de bloques mostrado en la Figura 30, se genera un archivo de Excel con todos los datos según el periodo de tiempo que se estableciera, en la Figura 31 se muestra este archivo de Excel donde se detalla la fecha y hora de cada una de las mediciones, además, del correspondiente valor de cada uno de los parámetros en su correspondiente columna, para efectos de la simulación se realizaron mediciones en periodos de cinco segundos para poder apreciar el funcionamiento de esta parte del código.

Time	Temperatura interna (ºC)	Temperatura externa (ºC)	Perdida de calor (W)	Coef. conductividad (W/mºC)	Temperatura ambiente (ºC)
3/5/2022 22:50:50,400	250	58	2524,857102	0,057989	25
3/5/2022 22:50:52,572	250	58	2524,857102	0,057989	25
3/5/2022 22:50:54,944	250	58	2524,857102	0,057989	25
3/5/2022 22:50:57,129	250	58,25	2549,361187	0,058628	25
3/5/2022 22:50:59,293	250	58,25	2549,361187	0,058628	25
3/5/2022 22:51:01,468	250	58,25	2549,361187	0,058628	25
3/5/2022 22:51:03,622	250	58,25	2549,361187	0,058628	25
3/5/2022 22:51:05,778	250	58,5	2573,914297	0,05927	25
3/5/2022 22:51:07,959	250	58,5	2573,914297	0,05927	25
3/5/2022 22:51:10,109	250	58,75	2598,51612	0,059915	25
3/5/2022 22:51:12,286	250	58,75	2598,51612	0,059915	25
3/5/2022 22:51:14,442	250	59,25	2647,864673	0,061213	25
3/5/2022 22:51:17,696	250	59,25	2647,864673	0,061213	25
3/5/2022 22:51:19,916	250	59,25	2647,864673	0,061213	25
3/5/2022 22:51:22,088	250	59,5	2672,610798	0,061866	25
3/5/2022 22:51:24,248	250	59,5	2672,610798	0,061866	25
3/5/2022 22:51:26,415	250	59,5	2672,610798	0,061866	25
3/5/2022 22:51:28,569	250	59,5	2672,610798	0,061866	25
3/5/2022 22:51:30,737	250	60	2722,245265	0,063181	25
3/5/2022 22:51:33,018	250	60	2722,245265	0,063181	25
3/5/2022 22:51:35,175	250	60	2722,245265	0,063181	25
3/5/2022 22:51:37,329	250	60,75	2797,048158	0,065174	25
3/5/2022 22:51:39,490	250	60,75	2797,048158	0,065174	25
3/5/2022 22:51:41,659	250	60,75	2797,048158	0,065174	25
3/5/2022 22:51:43,826	250	60,75	2797,048158	0,065174	25
3/5/2022 22:51:45,981	250	61,75	2897,429117	0,067872	25
3/5/2022 22:51:48,160	250	61,75	2897,429117	0,067872	25
3/5/2022 22:51:50,320	250	62	2922,637499	0,068553	25
3/5/2022 22:51:52,490	250	62	2922,637499	0,068553	25
3/5/2022 22:51:54,644	250	62,25	2947,890608	0,069238	25
3/5/2022 22:51:56,832	250	62,25	2947,890608	0,069238	25
3/5/2022 22:51:59,006	250	63,75	3100,334177	0,073405	25
3/5/2022 22:52:01,208	250	65,25	3254,30115	0,077676	25
3/5/2022 22:52:03,374	250	65,25	3254,30115	0,077676	25
3/5/2022 22:52:05,535	250	67,75	3513,997586	0,085025	25
3/5/2022 22:52:07,729	250	67,75	3513,997586	0,085025	25

Figura 31. Datos almacenados en el documento de Excel generado. Fuente: Elaboración propia.

Lo descrito anteriormente corresponde a la programación desarrollada para el monitoreo de la condición de la pared oeste de la hornilla, para el caso de cada una de las demás paredes se realizó el mismo procedimiento solamente varían el valor del área correspondiente a cada pared y para el caso del techo también cambia la ecuación para obtener la transferencia de calor por convección como se explicó oportunamente. El

desarrollo de la programación se realiza individualmente para que el usuario tenga la oportunidad de visualizar los datos de cada pared de manera más ordenada, si se presta atención en la interfaz de la Figura 28, en la parte superior se ubican las diferentes pestañas correspondientes a cada pared donde el usuario puede navegar en cada una de ellas, por la extensión del documento el código y la interfaz de las otras paredes se muestra en la sección de anexos.

16.4. Comparación con el consumo energético.

Como una parte importante del desarrollo de este proyecto es relacionar el deterioro del aislamiento térmico de la hornilla con el rendimiento energético del horno, para esto se realiza una interfaz donde se muestre el comportamiento en el tiempo de las pérdidas de calor totales para toda la hornilla, lo que corresponde a la suma de las pérdidas de calor de cada pared, además, se muestra el comportamiento del consumo de GLP del horno de esta manera se podrá notar como los cambios en la condición de del aislamiento pueden influir sobre el consumo energético del horno. En la Figura 32 se muestra el código realizado para esta sección.

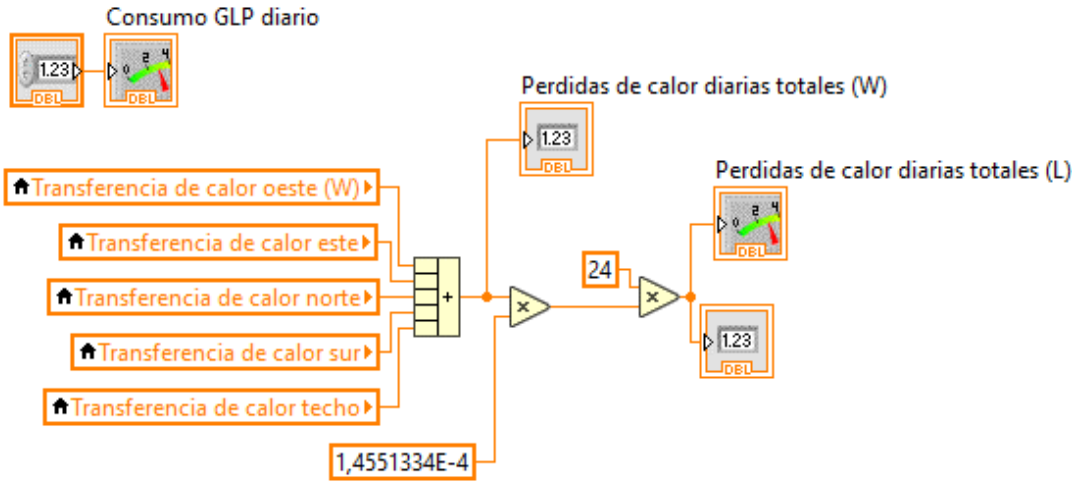


Figura 32. Diagrama de bloques para la medición de consumo de GLP y perdidas de calor en la hornilla. Fuente: Elaboración propia.

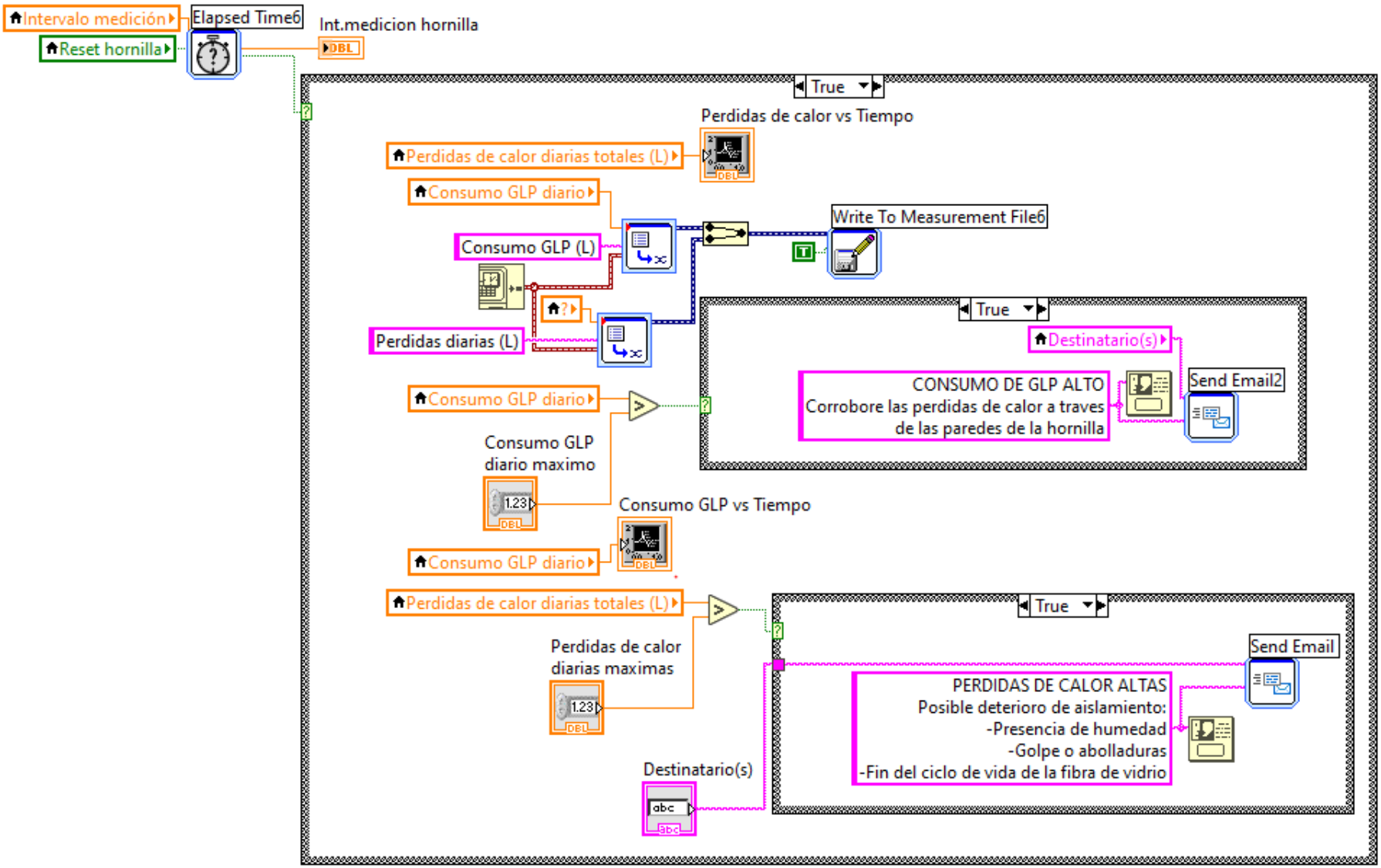


Figura 33. Diagrama de almacenamiento de datos y alertas para la hornilla. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la Figura 33, también se definen alertas para las pérdidas totales, así como alerta para el consumo del horno, esto según lo registrado diariamente y convertido a litros de GLP, ya que la empresa actualmente realiza el registro del consumo de GLP en litros consumidos. De lo anterior se obtiene la interfaz que se muestra en la Figura 34.

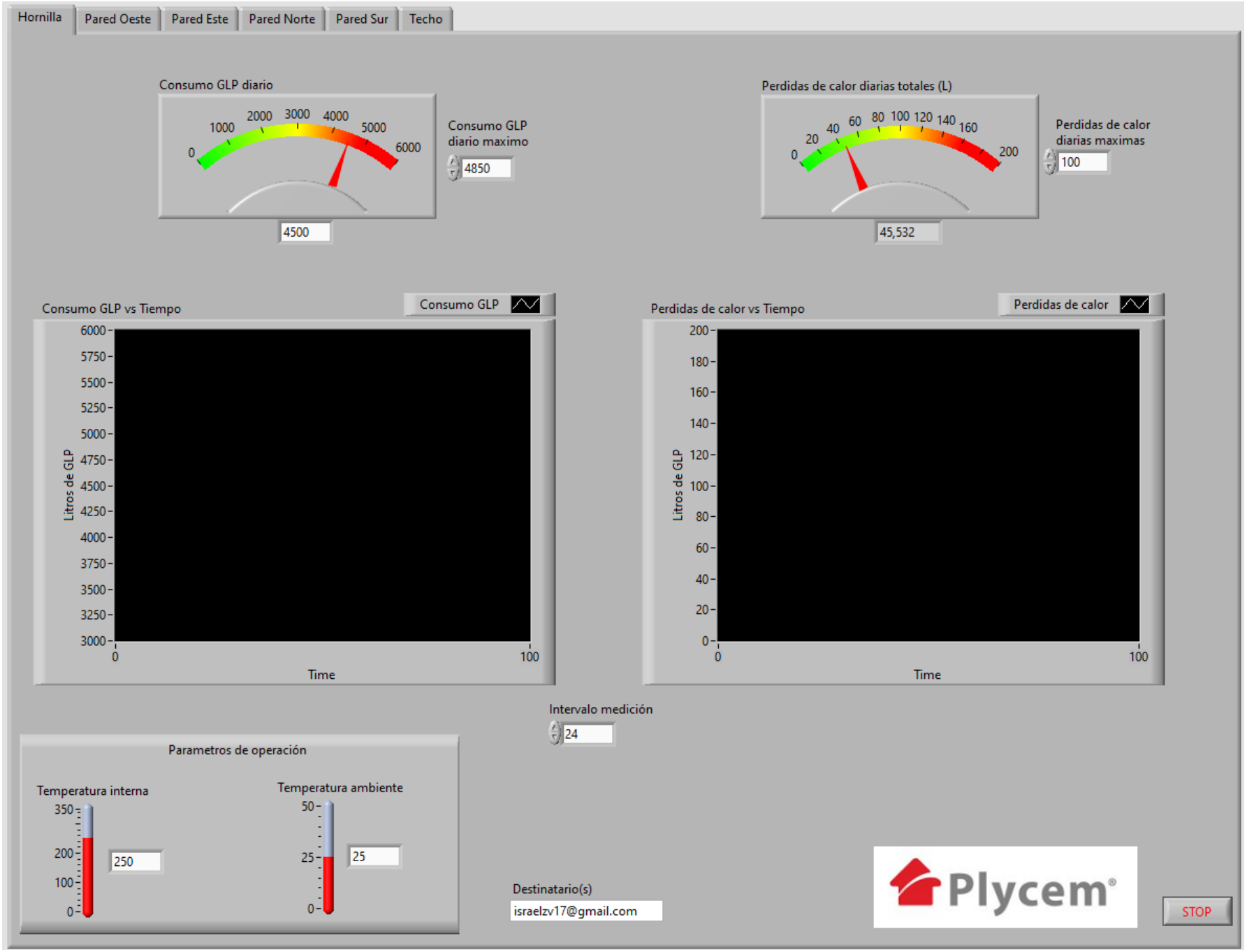


Figura 34. Interfaz para la hornilla. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la Figura 34, el sistema muestra en esta interfaz las gráficas de las mediciones de consumo de GLP en el tiempo y de pérdidas de calor totales en el tiempo, de esta manera se podrá apreciar el comportamiento del consumo conforme varían las pérdidas de calor en la hornilla. Como se puede notar en esta pestaña se encuentran los indicadores de los sensores de temperatura interna y la temperatura ambiente, además, el espacio para poder digitar el correo electrónico al cual se desea enviar las notificaciones cuando se genera una alerta. Finalmente, se puede apreciar el recuadro para escoger los intervalos de medición según lo desee el usuario. Para el consumo de GLP se estableció un valor de 4850 litros de GLP diarios como umbral, esto deducido a partir del registro histórico del consumo de los meses de marzo y abril del 2022, sin embargo, se habilita la opción para que el usuario pueda definir este umbral para que el personal pueda tener mayor flexibilidad para ajustarlo una vez se tenga un mayor registro de datos. Para el caso de las pérdidas de calor al igual que en los casos anteriores se define según los resultados observados en la simulación, pero cuando simultáneamente todas las paredes presentan temperaturas de 80°C, esto para definir una aproximación del umbral, sin embargo, como se ha mencionado antes se requiere de mayor cantidad de datos históricos para poder definir adecuadamente los umbrales.

17. Análisis economico.

En este análisis económico se trata de considerar aspectos de costos y posibles beneficios económicos al utilizar un monitoreo de la condición en tiempo real de la para realizar una oportuna intervención del aislamiento térmico y el posible impacto económico que tiene este en la tarifa de consumo energético. Para esto se toman una serie de consideraciones y escenarios diferentes para poder realizar la evaluación.

Como se ha podido constar a través de lo planteado en los cálculos y la simulación, cuando se eleva la temperatura externa de la hornilla, se observa que coeficiente de conductividad térmica y las pérdidas de calor a través de las paredes tienden a aumentar su valor. Entonces aprovechando la simulación se plantean escenarios con seis temperaturas distintas en las paredes externas del horno, estas temperaturas son algunas de las observadas cuando se realizaron mediciones de campo con el termómetro infrarrojo con una temperatura interna de 250°C y una temperatura ambiente de 25°C, la temperatura de 58°C fue la temperatura menor que se observó y según lo conversado con el supervisor de mantenimiento preventivo en ese sector de la hornilla recientemente se cambió una porción del aislamiento, por lo tanto, se toma este valor como el correspondiente a las pérdidas con un aislamiento nuevo el cual sirve de comparación para los demás escenarios.

En la tabla 15 se muestran los diferentes escenarios planteados, así como el correspondiente consumo de litros de GLP que se estarían perdiendo a través del aislamiento, además, se obtiene los costos que representa en la facturación estas pérdidas, para esto se utiliza el precio por cada litro de GLP para marzo 2022 que corresponde a 339,3 ₡/L.

TABLA 15. COSTOS ASOCIADOS A PÉRDIDAS DE CALOR EN LA HORNILLA.

Escenarios	Perdidas de calor por aislamiento en la hornilla			
	Pérdidas de calor diarias (L)	Costos por pérdidas diarios (₡)	Pérdidas de calor mensual (L)	Costos por pérdida mensuales (₡)
58°C (nuevo)	45,5	₡15 440,15	1365	₡463 204,63
70°C	67,7	₡22 973,59	2031	₡689 207,77
80°C	87,5	₡29 692,60	2625	₡890 778,14
90°C	108,1	₡36 683,09	3243	₡1 100 492,76
100°C	129,5	₡43 945,05	3885	₡1 318 351,64
120°C	174,2	₡59 113,73	5226	₡1 773 412,02

Basándose en los datos obtenidos en la tabla 15 se procede a obtener la diferencia en costos mensuales de operar el horno en alguno de los escenarios donde el aislamiento se encuentre deteriorado en comparación con el caso del aislamiento nuevo como se muestra en la tabla 16. Esto último es de suma importancia para entender como influiría un mantenimiento basado en la condición del aislamiento a partir del monitoreo en tiempo real con el costo asociado al consumo energético, ya que si el personal de mantenimiento pudiera recibir una alerta para coordinar con suficiente antelación la intervención del aislamiento de la hornilla se podría evitar incurrir en pérdidas económicas por concepto de consumo energético.

TABLA 16. AFECTACIÓN ECONÓMICA AL OPERAR CON UN AISLANTE DETERIORADO.

Escenarios	Afectación con respecto a un aislante nuevo				
	Diferencia con respecto al aislante nuevo (L)	Diferencia con respecto al aislante nuevo (₡)	Producción mensual (ton)	Litros/ tonelada (L/ton)	Costos/tonelada (₡/ton)
70°C	666	₡226 003,14	1894,0	0,35164	119,33
80°C	1260	₡427 573,51		0,66526	225,75
90°C	1878	₡637 288,13		0,99156	336,48
100°C	2520	₡855 147,01		1,33052	451,51
120°C	3861	₡1 310 207,38		2,03855	691,77

Como se puede apreciar en la tabla 16 también se muestra la influencia que pueden tener las pérdidas de calor en la hornilla en los costos por tonelada producida en el horno 2, para esto se toma un promedio de la producción mensual del horno desde enero 2021 hasta marzo de 2022, donde se obtiene que el costo por cada tonelada producida podría aumentar entre ₡119.33 a ₡6691.77 según los escenarios planteados.

Como se mencionó anteriormente, el prototipo de sistema propuesto podría permitir al personal de mantenimiento corregir los problemas del aislamiento y evitar las pérdidas económicas asociadas al consumo de energía extra para una misma producción. Por tanto, se vuelve de interés evaluar la viabilidad de invertir en el prototipo del monitoreo planteado, para esto se realiza un análisis económico a través de los indicadores financieros VAN y TIR para esto se toma de ejemplo el escenario de 80°C.

Es importante recordar que el Valor Anual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) que según Vaca et al (2019) son dos métodos de análisis de inversiones que se utilizan para conocer la posible rentabilidad de un proyecto financiero, así como la viabilidad de este. Muchos autores coinciden en que cualquiera de los dos o ambos métodos proveen de suficiente evidencia para determinar si un proyecto debe ser aceptado o no y que además ante la posibilidad de dudas el método separador será el VAN. Los criterios por considerar para cada indicador son los siguientes:

- VAN > 0 acepte el proyecto.
- VAN < 0 rechace el proyecto.
- VAN = 0 la decisión queda al criterio del analista
- Si TIR ≥ TMAR acepte el proyecto
- Si TIR < TMAR rechace el proyecto

Para la consideración de los costos de inversión los componentes para el prototipo del sistema de monitoreo en la tabla A8 se muestran algunos de los costos de los componentes necesarios para el monitoreo de los parámetros, además, en la Figura A20 se muestra la cotización de estos de donde se establece una inversión inicial para el prototipo propuesto de ₡104 238,75 esto solamente por concepto de equipos y sensores. En relación con los costos asociados al software utilizado para el proyecto se considera la adquisición de la licencia del software que tiene un costo de ₡353 470.29, además, se considera una capacitación a través de la plataforma Udemy para el uso del software con un costo de ₡6 694.51.

En relación con los costos de la instalación de los sensores y equipos para la medición se considera una estimación de los costos con el salario de un Electricista de ₡12 139,07 diarios, según la lista de salarios publicada por el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (2021) de Costa Rica, dicha lista se puede apreciar en la figura A21 en la sección de anexos. Además, se estima una duración de dos días de la instalación por lo que en total se consideran costos de mano de obra de ₡24 278,14. Por lo tanto, se considera para la inversión total un monto de ₡484 681.69.

Para poder obtener los indicadores del VAN y TIR se requiere establecer una tasa de descuento para esto se sigue lo indicado por Rebollar, et al., (2020) y con un índice de precio al consumidor (IPC) como 5,79% según el Instituto Nacional de Estadística y Censo (2022) de lo cual se obtiene una tasa de descuento de 16%. Para el análisis se toma en consideración la tendencia de los costos de GLP para los meses de entre enero 2021 y marzo 2022 y se logra apreciar que existe una tendencia al aumento de los costos de un 3%, con este valor se proyectan los costos para el análisis de los indicadores para los siguientes seis meses. En la tabla 17 se muestran los resultados obtenidos.

TABLA 17. EVALUACIÓN FIANCIERA DEL PROTOTIPO DE PARA EL MONITOREO EN TIEMPO REAL.

	Mes 0	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6
Inversión inicial	₡484 681.69						
Diferencia costos		₡427 573.51	₡440 400.71	₡453 612.73	₡467 221.11	₡481 237.75	₡495 674.88
Flujo de caja	-₡484 681.69	₡427 573.51	₡440 400.71	₡453 612.73	₡467 221.11	₡481 237.75	₡495 674.88
VAN	₡1 192 427.64						
TIR	89%						

De los resultados mostrados en la tabla 17, se obtuvieron resultados positivos para el VAN y TIR, por lo tanto, se puede considerar como una inversión viable, recordando que este análisis se realiza mediante estimaciones de posibles escenarios, sin embargo, se puede notar que a través del mantenimiento basado en condición para el asilamiento se pueden alcanzar beneficios económicos por concepto de facturación energética.

18. Conclusiones.

- Con el análisis energético realizado del balance energético y las bases de datos de la compañía, se determinó que el uso de energía del GLP representa el mayor consumo energético para toda la planta, además, se determinó que el horno 1, horno 2 y horno 3 representan los mayores usos significativos de energía, así mismo, se estableció que el horno 2 presenta el comportamiento menos favorable desde la perspectiva de la eficiencia energética.

- Se examinó el horno 2 mediante un Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad (AMFEC) de lo cual se dedujo que el aislamiento térmico de la hornilla representa un componte crítico que afecta tanto a la productividad como al rendimiento energético del horno 2, además, se estableció que la temperatura interna de la hornilla, la temperatura externa de las paredes de la hornilla, la temperatura ambiente y el consumo de GLP como parámetros a considerar en el monitoreo de la condición.

- Se desarrolló un plan piloto del monitoreo en tiempo real de la condición del aislamiento térmico mediante una simulación con el software LabVIEW, donde se establece como índice de salud del aislante térmico el comportamiento conductividad térmica en el tiempo, así mismo, mediante el monitoreo de las pérdidas de calor y el consumo de GLP se estableció una correlación entre el monitoreo de la condición del aislamiento térmico y el rendimiento energético del horno 2.

- Se determinó que un monitoreo en tiempo real podría permitirle al departamento de mantenimiento realizar una intervención anticipada y oportuna del aislamiento de la hornilla, lo que evitaría que le horno opere con pérdidas de calor indeseadas, a través de diversos escenarios se estimó las pérdidas económicas por no realizar una intervención a tiempo del aislamiento las cuales pueden variar entre los ₡226 003,14 a ₡1 310 207,38 mensuales en la facturación energética, lo que

representa una afectación de ₡119,33 a ₡691,77 por tonelada producida. Además, se realizó una evaluación de la inversión en un posible prototipo y se obtuvo una inversión inicial de ₡484 681.69 dando como resultado un VAN de ₡1 192 427.64 para un período de seis meses.

19.Recomendaciones y oportunidades de mejora.

- En una posible implementación del prototipo de monitoreo en tiempo real, se recomienda recolectar datos por un período de uno a dos años con la intención de poder corroborar el funcionamiento adecuado del sistema y también para poder ajustar con mayor precisión los umbrales máximos para generar las alertas.

- Se podrían considerar otras alternativas de equipos para el prototipo del monitoreo de la condición, como sensores de temperatura de mayor calidad y precisión o en lugar del microcontrolador propuesto la utilización de un PLC para la intercomunicación entre los sensores y el almacenamiento.

- Para el almacenamiento de los datos se recomienda realizarlo en la web o algún servidor para mayor seguridad de la información y evitar perdida de datos.

- En relación con la adquisición de datos en una posible implementación, se recomienda que se realice cuando el horno está en plena producción para mantener una consistencia entre los datos registrados, por ejemplo, no considerar las mediciones en los procesos de calentamiento del horno cuando ocurre un paro o se realiza el mantenimiento preventivo, ya que no serían datos comparables con el funcionamiento normal del horno.

- Con respecto al muestreo de los datos para el caso de las pérdidas totales en litros y el consumo del horno se sugiere tomar mediciones cada dos minutos y registrar el acumulado diario, esto para aprovechar que actualmente los datos de consumo son registrados cada dos minutos. Para el caso de transferencia de calor y la conductividad de cada pared se recomienda utilizar el promedio de las mediciones durante el día, para una mejor aproximación del comportamiento diario.

- Se podría considerar el desarrollo del monitoreo de la condición del aislamiento para otras secciones del horno o incluso para el horno 1 y horno 3 los cuales también representan un importante impacto energético en la compañía.

- Se podría analizar la incorporación de la humedad como un parámetro para evaluar la calidad del producto, sería preferible que el análisis se realice en conjunto con otros de apartamentos de la empresa como el departamento de calidad y producción.

20.Referencias.

Agencia Chilena de Eficiencia Energética. (2017). Beneficios de los Sistemas de Gestión de Energía basados en ISO 50001 y casos de éxito. https://guiaiso50001.cl/guia/wp-content/uploads/2017/05/Casos_exito_correccion9.pdf

Agencia de Sostenibilidad Energética. (2018). Guía de Implementación de Sistemas de Gestión de Energía basado en ISO 500001. https://www.guiaiso50001.cl/guia-de-apoyo/

Alfaro, A. (2020). Diseño de un sistema experto para el monitoreo y alerta de modos de falla para el sistema de bombeo de agua potable en el Tecnológico de Costa Rica. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/12301/TFG_Antony_Alfaro_Alvarado.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Alomá Chávez, E., & Malaver, M. (2007). Los conceptos de calor, trabajo, energía y teorema de Carnot en textos universitarios de termodinámica. *Educere, 11*(38), 477-487. http://ve.scielo.org/pdf/edu/v11n38/art14.pdf

Araya, G. V. (2020). Sistema de Gestión de la Energía para una planta de conservas. *Yulök Revista De Innovación Académica, 4*(1) https://doi.org/10.47633/yulk.v4i1.263

Araya, J. V. (2020). Modelo de gestión de la energía en la industria de fabricación de harina de trigo. *Yulök Revista De Innovación Académica, 4*(1) https://revistas.utn.ac.cr/index.php/yulok/article/view/261/225

Asociación de Fabricantes Españoles de Lanas Minerales Aislantes, & Asociación Nacional de Instaladores de Sistemas de Aislamiento Industrial. (2016). Guía de Buenas Prácticas en el Aislamiento Industrial. http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM015728.pdf

Bernal, W. (2017). EVALUACIÓN Y MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA PRODUCCIÓN DE QUESO FRESCO EN LA PLANTA DE CUNGAPITE (CAÑAR). *Universidad Estatal De Cuenca*, https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/27823/1/Trabajo%20de%20Titulaci%C3%B3n.pdf

Brown, C. E. (1998). Coefficient of Variation. In C. E. Brown (Ed.), *Applied Multivariate Statistics in Geohydrology and Related Sciences* (pp. 155-157). Springer Berlin Heidelberg. 10.1007/978-3-642-80328-4_13

Burbano, J. C., & Fonseca Díaz, N. (2007). Análisis Experimental En La Medición De Las Temperaturas Superficiales De Un Recinto Para Aplicaciones HVAC/R. *Scientia Et Technica, 5*(37), 205-210. http://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=4784313

Cabrera Abanto, M., & Baca Espinoza, L. (2016). ESTUDIO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO TERMICO INDUSTRIAL PARA DETERMINAR Y ANALIZAR SU RENDIMIENTO ENERGÉTICO EN EL TRANSPORTE DE NaSH Y SODA CÁUSTICA EN UNA EMPRESA MINERA. http://repositorio.uns.edu.pe/handle/UNS/2641

Cárcel Carrasco, F. J., Grau Carrión, J., & Pascual Guillamón, M. (2016). Elementos del conocimiento en la ingeniería del mantenimiento industrial. Final. *Mantenimiento En Latinoamérica, 8*(1), 9-14. http://hdl.handle.net/10251/102626

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa*. McGraw-Hill Interamericana.

CEPAL. (2018). Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de Costa Rica. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44285/S1800543_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Chacón, G. B. (2016). Costeo por operaciones: Aplicación para la determinación de precios justos en la industria del plástico. *Actualidad Contable Faces, 19*(32), 5-39.

Di Paolo Emilio, M. (2013). *Data Acquisition Systems*. Springer New York.

Dirección de Vigilancia de la Salud del Ministerio de Salud. (2021). *Situación Nacional Covid-19.* https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/centro-de-prensa/noticias/741-noticias-2020/1725-situacion-nacional-covid-19

Firdaus, N., Samat, H. A., & Mohamad, N. (2019). (2019). Maintenance for energy efficiency: a review. Paper presented at the *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, , 530*(1) 012047. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/530/1/012047/meta

Fundación Laboral de la Construcción. (2016). Aislamiento térmico de edificios. http://construye2020.eu/plataforma-sobre-formacion-profesional/recurso-de-formacion/aislamiento-termico-edificios/descarga

Ganesh, S., Su, Q., Vo, L. B. D., Pepka, N., Rentz, B., Vann, L., Yazdanpanah, N., O'Connor, T., Nagy, Z. K., & Reklaitis, G. V. (2020). Design of condition-based maintenance framework for process operations management in pharmaceutical continuous manufacturing. *International Journal of Pharmaceutics, 587,* 119621. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119621

García Garrido, S. (2010). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Editorial Díaz de Santos, S.A.

Ghazali, Z., M Ridhuan Tony Lim, & Abu Bakar Sedek A Jamak. (2019). Maintenance performance improvement analysis using Fuzzy Delphi method: A case of an international lube blending plant in Malaysia. *Journal of Quality in Maintenance Engineering, 25*(1), 162-180. http://dx.doi.org/10.1108/JQME-11-2016-0058

Guerra Huamali, C. W. (2016). Análisis de modos y efecto de falla en los scooptrams de la Empresa Minera Atacocha. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3669/Guerra%20Huamali.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Hidalgo, D. B., & Pérez, Y. M. (2016). Eficiencia energética, competitividad empresarial y economía verde. *Revista Publicando, 3*(9) https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5833551

Hoang, A. (2017). Energy efficiency-based prognostics for optimizing the maintenance decision-making in industrial systems. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01588070/document

Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2018). INTE/ISO 50001:2018 Sistemas de gestión de la energía - Requisitos con orientación para su uso.

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2022). Índice de Precios al Consumidor marzo 2022. https://www.inec.cr/sites/default/files/documetos-biblioteca-virtual/reeconomipc032022-08.pdf

International Electrotechnical Commission, (. (2018). *BS EN IEC 60812:2018: Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA).*British Standards Institute.

ISO. (2014). *ISO 50002:2014(es) Auditorías energéticas — Requisitos con orientación para su uso.* https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:50002:ed-1:v1:es:term:3.7

Kan, A., Zheng, N., Wu, Y., Wang, W., Zhang, X., Cai, H., & Cao, D. (2022). Theoretical prediction and aging experimental verification of the service life of vacuum insulation panels. *Cleaner Engineering and Technology, 8*, 100484. https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.clet.2022.100484

LEÓN, G., Edgar, A., CAMPOS AVELLA, J. C., & VANEGAS CHAMORRO, M. C. (2019). Metodología para la implementación de un sistema de Mantenimiento Centrado en la Eficiencia Energética (MCEE) en las organizaciones industriales a través de una herramienta informática. *Espacios*, *40*(11) http://www.revistaespacios.com/a19v40n11/a19v40n11p19.pdf

López, C. (2002). La electricidad el recorrido de la energía. https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2019/05/recorrido-de-la-energia-la-electricidad.pdf

Marín, J. (2020). Sistema de Monitoreo y Alerta de Modos de Fallas basado en el Pronóstico y Evaluación de la Salud de los Sistemas de Acondicionamiento del Laboratorio de Biotecnología del Tecnológico de Costa Rica sede Central. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/12313/TFG_Jeremy_Marin_Hernandez.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Mercado, V., & Peña, J. B. (2016). Modelo de gestión de mantenimiento enfocado en la eficiencia y optimización de la energía eléctrica. *Saber, 28*(1), 99-105. http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1315-01622016000100010&script=sci_abstract

Ministerio de Ambiente y Energía. (2018). Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050. https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/02/PLAN.pdf

Ministerio de Ambiente y Energía, MINAE. (2015). Plan Nacional de Energía 2015 - 2030. https://minae.go.cr/recursos/2015/pdf/VII-PNE.pdf

Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. (2021). Lista de Salarios Mínimos Sector Privado 2022. https://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/Documentos-Salarios/lista_salarios_2022.pdf

Montero Jimenez, J. J., Schwartz, S., Vingerhoeds, R., Grabot, B., & Salaün, M. (2020). Towards multi-model approaches to predictive maintenance: A systematic literature survey on diagnostics and prognostics. *Journal of Manufacturing Systems, 56,* 539-557. https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.jmsy.2020.07.008

National instruments. (2022). *¿Qué es Lab. VIEW ?* https://www.ni.com/es-cr/shop/labview.html

NRGY solutions. (2020). *Haga sus propios cálculos de transferencia de calor y ahorro por aislamiento térmico en industria.* http://nrgysolutions.mx/haga-sus-propios-calculos-transferencia-calor-ahorro-aislamiento-termico-en-industria/

Organización de las Naciones Unidas. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. *LC/G.2681-P/Rev.3,*

Orošnjak, M., Jocanović, M., Čavić, M., Karanović, V., & Penčić, M. (2021). Industrial maintenance 4.0 Horizon Europe: Consequences of the Iron Curtain and Energy-Based Maintenance. *Journal of Cleaner Production, 314,* 128034. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128034

Parpala, R. C., & Iacob, R. (2017). (2017). Application of IoT concept on predictive maintenance of industrial equipment. Paper presented at the *MATEC Web of Conferences, , 121* 02008. https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2017/35/matecconf_mse2017_02008.pdf

Plycem Construsistemas, S. A. (2021). *Nuestra Empresa.* https://www.plycem.com/nuestra-empresa

Portillo-Ramos, R. E., Segura, J. M., & Flórez-Marulanda, J. F. (2020). Análisis de consumos y costos eléctricos de producción por producto en una industria licorera. *Producción + Limpia, 15*(1), 49-61. 10.22507/pml.v15n1a4

Rastegari, A. (2017). *CONDITION BASED MAINTENANCE IN THE MANUFACTURING INDUSTRY FROM STRATEGY TO IMPLEMENTATION*. Mälardalen University.

Rebollar, S., Posadas, R. R., Rebollar, E., Hernández, J., & González, F. d. J. (2020). APORTES A INDICADORES DE EVALUACIÓN PRIVADA DE PROYECTOS DE INVERSIÓN. *Revista Mexicana De Agronegocios*, https://ageconsearch.umn.edu/record/303885/

RECOPE. (2016). Manual de productos. https://www.recope.go.cr/wp-content/uploads/2013/07/Manual-de-Productos-2016.pdf

Rodríguez Malagón, D. (2017). Componentes Mantenimiento Centrado en la confiabilidad y Diagrama Pareto de la Herramienta Informática para la Ingeniería de Mantenimiento. https://repositorio.uci.cu/jspui/handle/123456789/9374

Rozo-García, F. (2020). Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0. *Revista UIS Ingenierías, 19*(2), 177-191. 10.18273/revuin. v19n2-2020019

Ruiz Fuentes, V. (2020). AUDITORÍA ENERGÉTICA: HERRAMIENTA PARA LA MEJORA DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO. https://repositorio.udd.cl/bitstream/handle/11447/4695/Auditor%c3%ada%20energ%c3%a9tica%2c%20herramienta%20para%20la%20mejora%20del%20desempe%c3%b1o%20energ%c3%a9tico.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Salazar, D., & Cifuentes, J. I. (2016). Energía y conceptos aplicados. http://www.repositorio.usac.edu.gt/4465/1/Energ%C3%ADa%20y%20conceptos%20aplicados.pdf

Soler & Palau S.A. (2016). Manual de instalación Operación y Mantenimiento ventiladores centrífugos y axiales. https://www.solerpalau.mx/ASW/recursos/mman/MANUAL%20DE%20INSTALACION,%20OPERACION%20Y%20MANTENIMIENTO%20VENTILADORES%20CENTRIFUGOS%20Y%20AXIA

Tao, F., Wang, Y., Zuo, Y., Yang, H., & Zhang, M. (2016). Internet of Things in product life-cycle energy management. *Journal of Industrial Information Integration, 1*, 26-39. https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.jii.2016.03.001

Teay, S. H., & Albarbar, A. (2017). Adoption of MEMS technology in e-maintenance systems for rotating machinery. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, *59*(12), 659-668.

TESTO. *Tabla de emisividades.* https://static-int.testo.com/media/bd/b7/179e2db5dca8/Emissivity-table-ES.pdf

Vaca, L. M. F., Guerrero, M. F. G., Fajardo, C. E. V., Vaca, L. A. F., Santillán, X. L. Z., Granda, L. E. S., & Salazar, J. A. P. (2019). Valor Actual Neto Y Tasa Interna De Retorno Como Parámetros De Evaluación De Las Inversiones. *Investigación Operacional*, *40*(4), 469-474. https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=asn&AN=136929594&lang=es&site=ehost-live

Vásquez, A. (2006). La organización económica de la industria de hidrocarburos en el Perú: El mercado del gas licuado de petróleo. *Revista De La Competencia Y La Propiedad Intelectual, 2*(3), 63-131. https://revistas.indecopi.gob.pe/index.php/rcpi/article/view/131/146

Weather Spark. (2022). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Paraíso.* https://es.weatherspark.com/y/16148/Clima-promedio-en-Paraíso-Costa-Rica-durante-todo-el-año#:~:text=En%20Paraíso%2C%20los%20veranos%20son,más%20de%2027%20°C.

Zárate Montero, D., & Ramírez García, R. (2016). Matriz energética de Costa Rica.*2016*(4) http://library.fes.de/pdf-files/bueros/fesamcentral/12979.pdf

Zúñiga-Araya, M. (2014). Elaboración de una guía práctica para el uso eficiente de la energía en empresas MiPYMES del Sector Alimenticio en Costa Rica.

21.Anexos.

TABLA A1. METODOLOGÍA

Objetivo específico planteado	**Actividad por realizar**	**Fuente de información**	**Análisis de datos con criterios estadísticos.**	**Resultados esperados (Entregables)**
Objetivo específico # 1: Determinar el uso de la energía de la compañía mediante la realización de un balance energético bajo los estándares de norma ISO 50002, por línea de producción en la compañía.	Recolectar información de los equipos y recursos energéticos de la compañía. Determinar el proceso de mayor impacto utilizando un diagrama de Pareto. Realizar un balance energético.	Facturas de electricidad. Facturas de derivados del petróleo. Norma ISO 50002.	Definir una muestra poblacional. Media y coeficiente de variación. Diagrama de Pareto.	Informes, tablas de Excel y gráficos.
Objetivo específico # 2: Examinar el sistema electromecánico crítico identificado en el balance energético por medio de un estudio de Análisis de Modos de Falla, Efecto y criticidad (AMFEC) para el establecimiento de los parámetros que serán considerados en el monitoreo.	Realizar un Análisis de Modos de Falla, Efecto y Criticidad (AMFEC) para el sistema electromecánico crítico.	Registro de actividades de mantenimiento en el equipo. Norma IEC 60812:2018. Base de datos de la biblioteca del TEC y libros sobre RCM.	Análisis de modos de falla del sistema electromecánico crítico, diagrama de Pareto.	Informe donde se definen los parámetros a ser monitoreados según los resultados del AMFEC.
Objetivo específico # 3: Plantear un plan piloto de monitoreo en tiempo real del consumo energético y parámetros necesarias desde la perspectiva de mantenimiento industrial para el establecimiento de la correlación del CBM y el rendimiento energético.	Definir los sistemas de hardware y software necesarios para el monitoreo. Programar y diseñar el sistema de software y hardware para la medición y almacenamiento de los datos.	Base de datos de la biblioteca del TEC e internet en general. Información técnica de los proveedores de los componentes necesarios para el prototipo del monitoreo de la condición.	Comparación de las posibles alternativas para el monitoreo de la condición en tiempo real.	Una propuesta de prototipo para el monitoreo del equipo crítico que toma datos tanto de los parámetros de funcionamiento y del consumo energético.
Objetivo específico # 4: Determinar el impacto financiero de la creación del prototipo de monitoreo en tiempo real hacia la rentabilidad del negocio por unidad producida.	Elaborar un análisis financiero del impacto del proyecto.	Base de datos de la biblioteca del TEC e internet en general. Información de los costos asociados al producto.	Tablas del cálculo de los costos, herramientas de análisis de datos financieros.	Informe de la evaluación financiera del impacto económico del proyecto.

TABLA A2. PLAN DE TRABAJO.

Actividad	Semanas																	
	Previo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Revisión previa de literatura.																		
Coordinación con el asesor industrial.																		
Recolecta de información de los equipos y recursos energéticos de la compañía (Facturas eléctricas y derivados del petróleo).																		
Determinar el proceso de mayor impacto utilizando un diagrama de Pareto.																		
Realizar un balance de energía con gráficos y tablas según la información recolectada.																		
Realizar un Análisis de Modos de Falla y Efecto para el equipo identificado como crítico.																		
Definir el hardware y software necesarios para el monitoreo en tiempo real.																		
Programar y diseñar el sistema de software y hardware para la medición y almacenamiento de datos.																		
Elaborar un análisis financiero del impacto del proyecto hacia la rentabilidad del negocio.																		
Análisis de los resultados del proyecto.																		
Trabajar en el informe escrito del proyecto.																		
Entrega de borrador del TFG a profesores lectores																		
Revisión de corrección de observaciones con el profesor guía																		
Revisión de carta de aprobación de filólogo																		
Entrega de TFG al coordinador																		
Defensa de TFG																		

TABLA A3. LITROS DE GLP CONSUMIDOS POR CADA TONELADA PRODUCIDA Y COSTOS ENERGÉTICOS POR CADA TONELADA EN EL HORNO 2.

Fecha	Consumo horno 2 (L)	Producción (Ton)	Litro por tonelada (L/ton)	Facturación mensual (¢)	Costos por tonelada (¢/ton)
ene-21	86 114	1 745	49,34	18 891 734	10 825
feb-21	85 787	1 764	48,63	20 595 406	11 674
mar-21	105 868	1 833	57,77	28 169 098	15 372
abr-21	92 490	1 765	52,41	25 968 314	14 716
may-21	111 516	2 134	52,27	31 157 639	14 604
jun-21	110 253	2 042	53,99	29 407 557	14 400
jul-21	115 610	2 267	50,99	32 997 401	14 555
ago-21	101 217	1 643	61,62	32 027 947	19 498
sep-21	96 721	1 799	53,76	31 026 640	17 245
oct-21	105 983	2 048	51,76	35 903 789	17 534
nov-21	137 633	2 051	67,12	53 112 847	25 901
dic-21	137 409	1 946	70,63	52 963 551	27 222

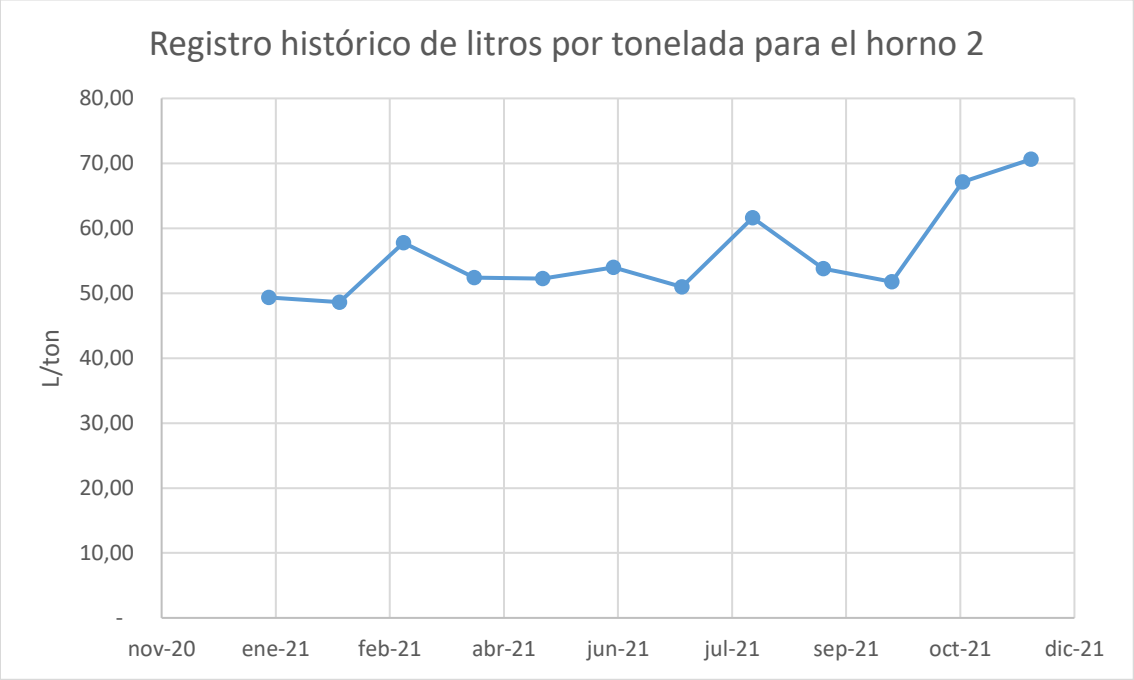


Figura A1. Comportamiento histórico del consumo de litros de GLP por tonelada producida para el horno 2. Fuente: Elaboración propia.

TABLA A4. LITROS DE GLP CONSUMIDOS POR CADA TONELADA PRODUCIDA Y COSTOS ENERGÉTICOS POR CADA TONELADA EN EL HORNO 3.

Fecha	Consumo horno 3 (L)	Producción (Ton)	Litro por tonelada (L/ton)	Facturación mensual (¢)	Costos por tonelada (¢/ton)
ene-21	103 746	2 164	47,94	22 759 711	10 516
feb-21	113 864	2 566	44,38	27 335 996	10 654
mar-21	141 463	2 520	56,13	37 640 186	14 934
abr-21	95 933	1 984	48,35	26 935 091	13 574
may-21	127 822	2 370	53,93	35 713 625	15 067
jun-21	120 972	2 497	48,45	32 266 379	12 924
jul-21	113 600	2 630	43,19	32 423 744	12 327
ago-21	100 122	2 537	39,46	31 681 295	12 487
sep-21	153 040	2 947	51,93	49 093 041	16 660
oct-21	150 022	2 961	50,66	50 823 048	17 163
nov-21	145 705	3 191	45,67	56 228 111	17 623
dic-21	114 345	2 907	39,34	44 073 657	15 164

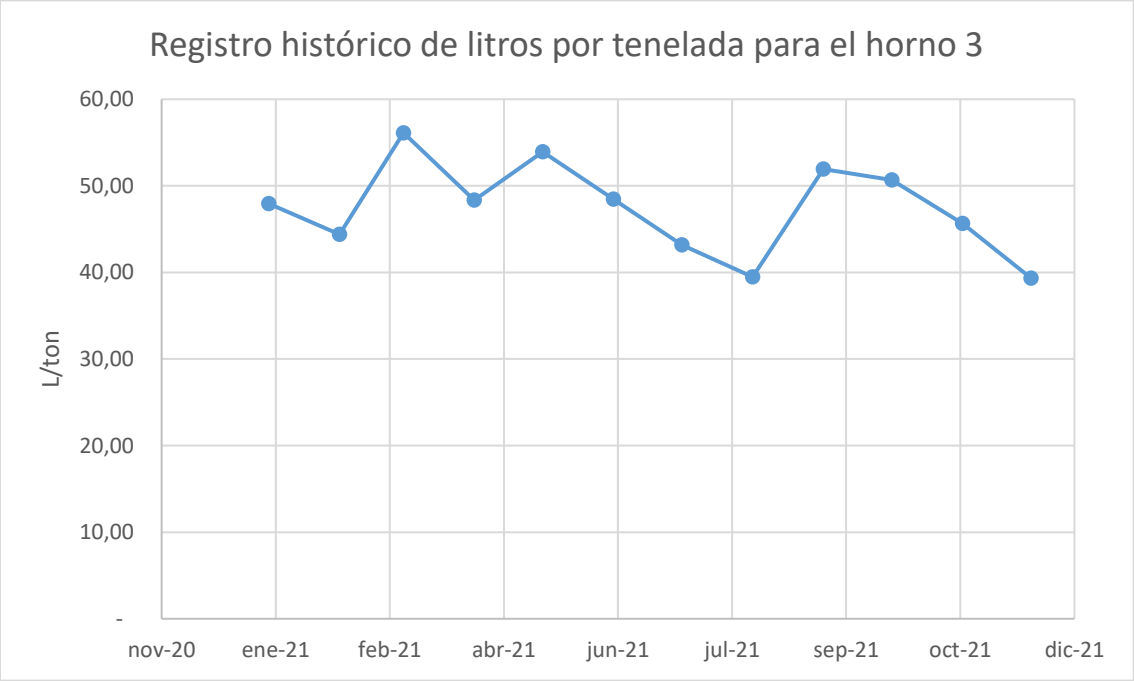


Figura A2. Comportamiento histórico del consumo de litros de GLP por tonelada producida para el horno 3. Fuente: Elaboración propia.

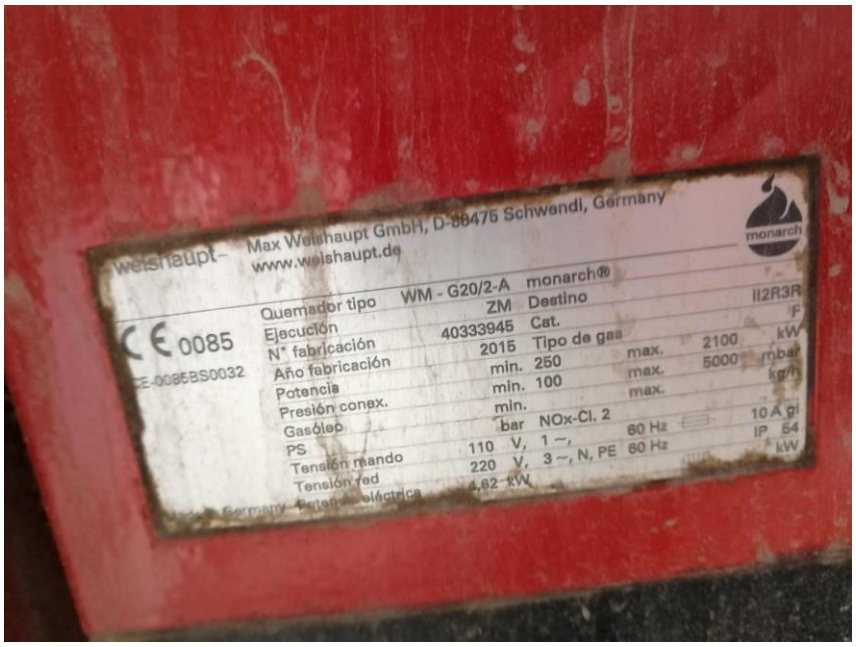


Figura A3. Placa característica del quemador del horno 1. Fuente: Elaboración propia.

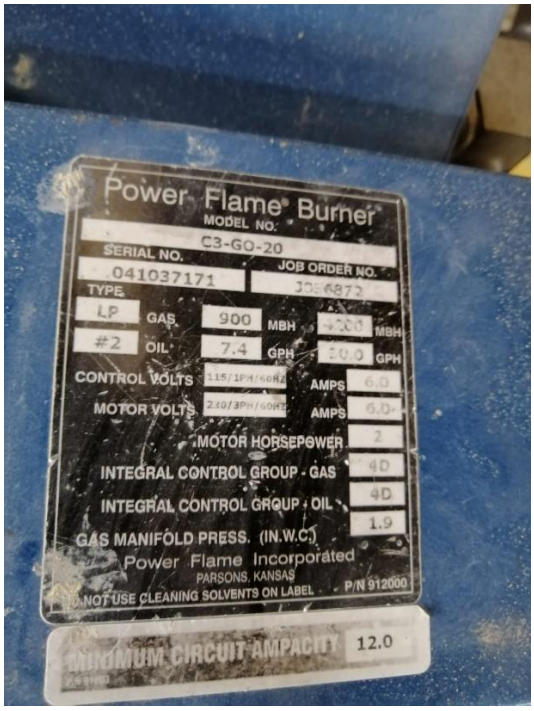


Figura A4. Placa característica del quemador del horno 2. Fuente: Elaboración propia.

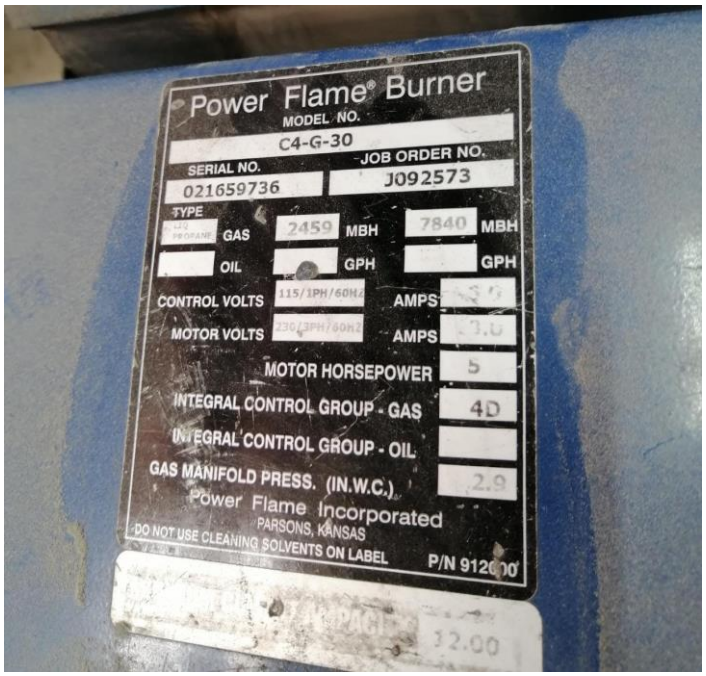


Figura A5. Placa característica del quemador del horno 3. Fuente: Elaboración propia.

TABLA A5. HISTORIAL DE FALLAS REPORTADAS EN EL 2021 PARA EL HORNO 2.

Equipo	Tipo de paro	Descripción de la falla	Horas de paro	Horas de paro totales	Paros mecánicos	Paros eléctricos	Paros totales
Conveyor	Paros mecánicos	Se revienta cadena en conveyor	0,33	2,75	4	0	4
	Paros mecánicos	Mesa de conveyor quebrada	0,67				
	Paros mecánicos	Motor de conveyor dañado	0,58				
	Paros mecánicos	Problemas con la cadena del conveyor	1,17				
Puerta	Paros mecánicos	Se revienta cable de la puerta	0,83	8,08	8	1	9
	Paros mecánicos	cable de la puerta	1,42				
	Paros mecánicos	Se revienta cable de la puerta	0,67				
	Paros mecánicos	Se revienta cable de la puerta	0,58				
	Paros mecánicos	Se revienta cable de la puerta	0,33				
	Paros mecánicos	se rompe cable de la puerta	0,83				
	Paros mecánicos	Paro por problemas con la compuerta	1,00				
	Paros mecánicos	Se rompe cable de la puerta	1,50				
	Paros eléctricos	Problemas con la puerta	0,92				
Robots	Paros eléctricos	Robot ventosas no enciende vacío	0,42	31,19	6	6	12
	Paros eléctricos	Falla en robot de ventosas	0,45				
	Paros mecánicos	Se quiebra pistón de robot ventosas	14,58				
	Paros mecánicos	Ventosa dañada	0,33				
	Paros mecánicos	Maguera hidráulica rota	2,08				
	Paros eléctricos	Problemas de ejes de ventosas	0,75				
	Paros eléctricos	Sobrecalentamiento en panel de robot	1,25				
	Paros mecánicos	se modifica herramienta de ventosas carga	4,00				
	Paros mecánicos	Problemas en electroválvulas	0,75				
	Paros eléctricos	PLC dañado	5,00				

	Paros mecánicos	problemas con el aire	1,00				
	Paros eléctricos	Robot en falla de sobre temperatura	0,58				
Transferidor	Paros mecánicos	Problemas con el transferidor	1,67	5,42	2	4	6
	Paros mecánicos	Falla en el transferidor se quebró pin	0,58				
	Paros eléctricos	Falla en posición de transferidor	0,67				
	Paros eléctricos	Sensor no detecta posición y daña cables	1,00				
	Paros eléctricos	No funciona cambio de transferidor	0,50				
	Paros eléctricos	Problema de señales en transferidores	1,00				
Retorno	Paros mecánicos	Problemas con retorno	0,33	2,08	2	2	4
	Paros eléctricos	Falla en señales de retorno	0,25				
	Paros eléctricos	Pato carril norte se descarrila	0,50				
	Paros mecánicos	Se revienta cadena de retorno horno 2	1,00				
Mesa giratoria	Paros eléctricos	micro de mesa giratoria	0,42	0,42	0	1	1
Canasta	Paros mecánicos	Se descarrila canasta	1,50	1,50	1	0	1
Quemador	Paros eléctricos	Quemador se apagó	0,33	0,58	0	2	2
	Paros eléctricos	Problemas con el quemador	0,25				
Sistema de seguridad del horno	Paros eléctricos	Se desprende hongo de seguridad	0,33	0,33	0	1	1
Voller	Paros eléctricos	Micro se quiebra	1,00	1,00	0	1	1
Panel de control del horno	Paros eléctricos	Problema con PLC no hay comunicación	2,67	2,67	0	1	1
Rodillos	Paros eléctricos	PLC se bloquea por corto en líneas	2,00	2,00	0	1	1
Otros	Paros mecánicos	Falla en bomba hidráulica	1,33	1,33	1	0	1

TABLA A6. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA, EFECTO Y SU CRITIRICIDAD PARA EL HORNO 2.

Función del elemento			**Modo de fallo potencial**	**Efecto potencial del fallo**		**Causa o mecanismo potencial del fallo**	**Detalle de la causa o mecanismo potencial del fallo**	**Severidad**	**Ocurrencia**	**Detección**	**NPR**
Sub sistema	**Conjunto**	**Componente**		**Efecto local**	**Efecto final**						
Carga											
	Puerta										
		Cable	La puerta no sube	La puerta de la entrada al horno no sube lo que no permite que las canastas puedan entrar en el horno	Se ve afectada la producción en el horno, es imposible que las canastas entren en el horno	Se daña el cable	El cable que sujeta la puerta y la eleva se rompe y la puerta no se mueve.	8	8	1	64
	Voller										
		Pistón	Fuga de aceite	Perdida de presión en el pistón del voller	Se ve afectada la producción en el horno, ya que no se pueden mover canastas	Se daña la unión de la manguera con el pistón	La unión de la manguera con el pistón presenta fuga de aceite y afecta el	9	3	2	54

					dentro del horno		funcionamiento del pistón				
		Manguera hidráulica	Fuga de aceite	Perdida de presión en el pistón del voller	Se ve afectada la producción en el horno, ya que no se pueden mover canastas dentro del horno	Maguera hidráulica dañada	La manguera presenta fisura o rotura	9	3	2	54
		Sensor	El voller no realiza el recorrido necesario	El sistema de control del voller pierde la señal de posición y no realiza el movimiento requerido	Se ve afectada la producción en el horno, ya que no se pueden mover canastas dentro del horno	Sensor dañado	El sensor de posición se quiebra o presenta problemas con la señal	7	8	3	168
	Robot ventosas										
		Conector eléctrico	Robot no se mueve	El robot se bloquea y no realiza ningún movimiento	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Daños en conector eléctrico	El cable de multilíneas se separa del conector y se interrumpe el funcionamiento del robot	9	8	1	72
		Ventilador del panel de control	Robot no se mueve	Sobrecalentamiento del panel de control del robot	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Falla en el ventilador del panel de control.	No existe el flujo de aire para la adecuada ventilación del panel.	8	2	6	96
		Driver	Robot no realiza los movimientos correctamente	Ejes de robot desincronizados	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad	Driver con problemas	Driver de control presenta problemas y los ejes del robot no se sincronizan	8	4	6	192

					de canastas cargadas						
		Pistón de compensación	Robot no realiza los movimientos correctamente	El sistema de compensación falla	Se ve afectada la producción, ya que tiende a ser una falla de tiempo prolongado y se debe cargar las canastas manualmente	Pistón de compensación	Pistón pierde presión y se atasca	9	2	1	18
		Ventosas dañadas	No sujeta las láminas	Se pierde la presión de vacío en las ventosas	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Ventosas desgastadas	El desgaste provoca pequeñas fisuras en las ventosas lo que provoca la perdida de vacío	7	7	2	98
		Bomba de vacío	No sujeta las láminas	Se pierde la presión de vacío en las ventosas	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Bomba de vacío dañada	Las bombas tienden a presentar suciedad por aceite, polvo, plástico u otros	7	6	2	84
		Electroválvula	No sujeta las láminas	Bombas de vacío no son alimentadas con el aire comprimido	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Electroválvulas neumáticas dañadas		7	6	2	84
	Robot de imanes										

		Consola (KCP)	No muestra ninguna imagen en la pantalla de la consola	No es posible operar el robot	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Cableado dañado	El cable se corta y se pierde la señal	8	4	2	64
		Driver	Robot no realiza los movimientos correctamente	Ejes de robot desincronizados	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Driver con problemas	Driver de control presenta problemas y los ejes del robot no se sincronizan	8	4	6	192
		Resistencias	Robot no realiza los movimientos correctamente	El robot se bloquea y no realiza ningún movimiento	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Circuito abierto	Las resistencias se abren y se pierde la comunicación con el robot	8	3	8	192
		Estructura de la herramienta	Estructura dañada	La herramienta no es lo suficientemente firme	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Tornillos o parales quebrados	Con el uso los tornillos o la estructura en general puede llegar a fallar	8	3	2	48
	Conveyor										
		Cadena	El conveyor no se mueve	No mueve las tarimas con láminas hacia la posición requerida por el robot	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad	Cadena dañada	La cadena se rompe y no mueve las láminas	5	4	2	40

					de canastas cargadas						
		Motor	El conveyor no se mueve	No mueve las tarimas con láminas hacia la posición requerida por el robot	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Motor dañado		5	4	2	40
		Sensor de mesa giratoria	Mesa giratoria no realiza el movimiento requerido	No trasladan las tarimas vacías hacia la posición requerida	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Sensor dañado	El sensor de posición se quiebra o presenta problemas con la señal	5	6	3	90
		Estructura del conveyor	Estructura dañada	La estructura no tiene firmeza y no realiza las funciones correctamente	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Estructura quebrada		5	1	1	5
	Retorno										
		Cadena	Las canastas no llegan al área de carga del horno	Incapaz de mover el elemento que empuja las canastas "pato"	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Cadena dañada	La cadena se rompe y no se pueden mover las canastas por el carril de retorno	7	4	2	56

		Sensor fotoeléctrico	Las canastas no llegan al área de carga del horno	Se pierde la señal del sensor y no se realiza el movimiento deseado	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Sensor dañado	Se abren las líneas en el sensor fotoeléctrico	7	4	4	112
		Elemento que empuja las canastas "pato"	Las canastas no llegan al área de carga del horno	Incapaz de mover las canastas por el carril de retorno	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Descarrilamiento		7	5	1	35
	Transferidor										
		Pin posicionador	No fija el transferidor	La canasta se descarrila	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Pin dañado		9	2	1	18
		Base de sensor de posición	Transferidor no realiza los movimientos requeridos	No se posicionan las canastas adecuadamente para ser cargadas, puede llegar a dañar otros componentes como el cableado o cadena plástica	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Base para sensor de posición quebrada	El sensor no detecta la posición del transferidor por los problemas con la base	9	5	2	90
		Sensor de posición	Transferidor no realiza los movimientos requeridos	No se posicionan las canastas adecuadamente para ser cargadas, puede llegar a dañar otros componentes como el cableado o cadena plástica	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad	Sensor dañado		9	5	2	90

					de canastas cargadas						
		Cableado	Transferidor no realiza los movimientos requeridos	No se posicionan las canastas adecuadamente para ser cargadas	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Cables dañados		8	4	3	96
		Levitador	No eleva la canasta a la posición requerida	El transferidor no puede moverse hacia la siguiente canasta	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Fuga de aceite	Se pierde presión y los pistones no suben.	8	3	2	48
	Turbina										
		Aspa del ventilador	Turbina disparada	Las láminas podrían caerse mientras están en la canasta	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Aspas del ventilador dañadas		7	4	2	56
		Contactor	La turbina no enciende	Las láminas podrían caerse mientras están en la canasta	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Contactor dañado		7	5	3	105
Descarga											

	Puerta										
		Cable	La puerta no sube	La puerta de la salida del horno no sube lo que no permite que las canastas puedan salir del horno	Se ve afectada la producción en el horno, es imposible que las canastas salgan del horno	Se daña el cable	El cable que sujeta la puerta y la eleva se rompe y la puerta no se mueve.	8	8	1	64
	Voller										
		Pistón	Fuga de aceite	Perdida de presión en el pistón del voller	Se ve afectada la producción en el horno, ya que no se pueden sacar canastas de dentro del horno	Se daña la unión de la manguera con el pistón	La unión de la manguera con el pistón presenta fuga de aceite y afecta el funcionamiento del pistón	9	3	2	54
		Manguera hidráulica	Fuga de aceite	Perdida de presión en el pistón del voller	Se ve afectada la producción en el horno, ya que no se pueden mover canastas dentro del horno	Maguera hidráulica dañada	La manguera presenta fisura o rotura	9	3	2	54
		Sensor	El voller no realiza el recorrido necesario	El sistema de control del voller pierde la señal de posición y no realiza el movimiento requerido	Se ve afectada la producción en el horno, ya que no se pueden mover canastas dentro del horno	Sensor dañado	El sensor de posición se quiebra o presenta problemas con la señal	7	8	3	168
	Robot ventosas										
		Conector eléctrico	Robot no se mueve	El robot se bloquea y no realiza ningún movimiento	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Daños en conector eléctrico	El cable de multilíneas se separa del conector y se interrumpe el funcionamiento del robot	9	8	1	72
		Ventilador del panel de control	Robot no se mueve	Sobrecalentamiento del panel de control del robot	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración,	Falla en el ventilador del panel de control.	No existe el flujo de aire para la adecuada ventilación del panel.	8	2	6	96

					del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas						
		Driver	Robot no realiza los movimientos correctamente	Ejes de robot desincronizados	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Driver con problemas	Driver de control presenta problemas y los ejes del robot no se sincronizan	8	4	6	192
		Pistón de compensación	Robot no realiza los movimientos correctamente	El sistema de compensación falla	Se ve afectada la producción, ya que tiende a ser una falla de tiempo prolongado y se debe cargar las canastas manualmente	Pistón de compensación	Pistón pierde presión y se atasca	9	2	1	18
		Ventosas dañadas	No sujeta las láminas	Se pierde la presión de vacío en las ventosas	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Ventosas desgastadas	El desgaste provoca pequeñas fisuras en las ventosas lo que provoca la perdida de vacío	7	7	2	98
		Bomba de vacío	No sujeta las láminas	Se pierde la presión de vacío en las ventosas	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Bomba de vacío dañada	Las bombas tienden a presentar suciedad por aceite, polvo, plástico u otros	7	6	2	84
		Electroválvula	No sujeta las láminas	Bombas de vacío no son alimentadas con el aire comprimido	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de	Electroválvulas neumáticas dañadas		7	6	2	84

					la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas						
	Robot de imanes										
		Consola (KCP)	No muestra ninguna imagen en la pantalla de la consola	No es posible operar el robot	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Cableado dañado	El cable se corta y se pierde la señal	8	4	2	64
		Driver	Robot no realiza los movimientos correctamente	Ejes de robot desincronizados	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Driver con problemas	Driver de control presenta problemas y los ejes del robot no se sincronizan	8	4	6	192
		Resistencias	Robot no realiza los movimientos correctamente	El robot se bloquea y no realiza ningún movimiento	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Circuito abierto	Las resistencias se abren y se pierde la comunicación con el robot	8	3	8	192
		Estructura de la herramienta	Estructura dañada	La herramienta no es lo suficientemente firme	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Tornillos o parales quebrados	Con el uso los tornillos o la estructura en general puede llegar a fallar	8	3	2	48

	Rodillos	PLC	Lo rodillos no se mueven	No se transportan las láminas a la siguiente etapa del proceso	Podría afectar la producción si se acumulan demasiadas láminas y no se pueden extraer mas	Cortocircuito en las líneas	Se pierde comunicación con la señal del PLC	7	4	4	112
	Transferidor										
		Pin posicionador	No fija el transferidor	La canasta se descarrila	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Pin dañado		9	2	1	18
		Base de sensor de posición	Transferidor no realiza los movimientos requeridos	No se posicionan las canastas adecuadamente para ser descargadas	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Base para sensor de posición quebrada	El sensor no detecta la posición del transferidor por los problemas con la base	9	5	2	90
		Sensor de posición	Transferidor no realiza los movimientos requeridos	No se posicionan las canastas adecuadamente para ser descargadas, puede llegar a dañar otros componentes como el cableado o cadena plástica	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Sensor dañado		9	5	2	90
		Cableado	Transferidor no realiza los movimientos requeridos	No se posicionan las canastas adecuadamente para ser descargadas	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Cables dañados		8	4	3	96

		Levitador	No eleva la canasta a la posición requerida	El transferidor no puede moverse hacia la siguiente canasta	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Fuga de aceite	Se pierde presión y los pistones no suben.	8	3	2	48
	Turbina										
		Aspa del ventilador	Turbina disparada	Las láminas podrían caerse mientras están en la canasta	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Aspas del ventilador dañadas		7	4	2	56
		Contactor	La turbina no enciende	Las láminas podrían caerse mientras están en la canasta	No necesariamente afectará la producción del horno, dependerá de la duración, del ciclo y la disponibilidad de canastas cargadas	Contactor dañado		7	5	3	105
Sistema de seguridad											
	Hongo de seguridad	Hondo de seguridad	Se detiene la operación del sistema de descarga o carga	No se puede operar el horno	Se ve afectada la producción en el horno, es imposible que las canastas entren en el horno	Hongo de seguridad dañado		8	3	4	96
Sistema de horneado											
	Gabinete de control										

		PLC	No hay comunicación con los demás elementos del horno	No se puede operar el horno	Se ve afectada la producción en el horno, es imposible que las canastas entren en el horno	Perdida de comunicación con el robot		9	3	5	135
	Quemador										
		Sistema de ignición	El quemador se apaga	El horno se detiene y la temperatura interna del horno empieza a disminuir	Se ve afectada la producción en el horno, se interrumpe el flujo de aire caliente y el secado de las láminas	Desajuste en el sistema de ignición y en el electrodo del quemador		8	3	4	96
		Tarjeta de control	Lectura de baja temperatura	No se regula la temperatura en el rango deseado	Se ve afectada la producción en el horno, se interrumpe el flujo de aire caliente y el secado de las láminas	Tarjeta de control dañada		8	3	5	120
	Abanico principal										
		Rodamiento	Vibración, ruido o calentamiento excesivo	No se reduce adecuadamente la fricción	Afectación al flujo de aire y temperatura del horno	Rodamiento dañado	Falta de lubricación, desalineamiento	7	1	3	21
		Eje	Vibración y ruido	No transmite adecuadamente el movimiento	Afectación al flujo de aire y temperatura del horno	Eje desalineado		7	1	3	21
		Hélice	Bajo flujo de aire	No se impulsa el aire adecuadamente en la hornilla	Afectación al flujo de aire y temperatura del horno	Hélice dañada		7	1	3	21
		Fajas	Vibración, ruido o calentamiento excesivo	No transmite adecuadamente el movimiento	Afectación al flujo de aire y temperatura del horno	Fajas demasiado flojas y demasiado tensas		7	1	3	21
		Fajas	Ventilador detenido	No se transmite movimiento del todo	Se ve afectada la producción en el horno, se interrumpe el flujo de aire caliente y el secado de las láminas	Fajas rotas		8	1	3	24

		Polea	Ventilador detenido	No se transmite movimiento del todo	Se ve afectada la producción en el horno, se interrumpe el flujo de aire caliente y el secado de las láminas	Polea suelta		8	1	3	24
		Motor	Ventilador detenido	No se transmite movimiento del todo	Se ve afectada la producción en el horno, se interrumpe el flujo de aire caliente y el secado de las láminas	Motor dañado		9	2	3	54
	Abanico de ducto										
		Rodamiento	Vibración, ruido o calentamiento excesivo	No se reduce adecuadamente la fricción	Afectación al flujo de aire y temperatura del horno	Rodamiento dañado	Falta de lubricación, desalineamiento	6	1	3	18
		Eje	Vibración y ruido	No transmite adecuadamente el movimiento	Afectación al flujo de aire y temperatura del horno	Eje desalineado		6	1	3	18
		Hélice	Bajo flujo de aire	No se impulsa el aire adecuadamente en la hornilla	Afectación al flujo de aire y temperatura del horno	Hélice dañada		6	1	3	18
		Motor	Ventilador detenido	No se transmite movimiento del todo	Se ve afectada la producción en el horno, se interrumpe el flujo de aire caliente y el secado de las láminas	Motor dañado		8	2	3	48
	Abanico interno										
		Rodamiento	Vibración, ruido o calentamiento excesivo	No se reduce adecuadamente la fricción	Afectación al flujo de aire y temperatura del horno	Rodamiento dañado	Falta de lubricación, desalineamiento	5	1	4	20
		Eje	Vibración y ruido	No transmite adecuadamente el movimiento	Afectación al flujo de aire y temperatura del horno	Eje desalineado		5	1	4	20
		Hélice	Bajo flujo de aire	No se impulsa el aire adecuadamente en la hornilla	Afectación al flujo de aire y temperatura del horno	Hélice dañada		5	1	4	20

		Motor	Ventilador detenido	No se transmite movimiento del todo	Se ve afectada la producción en el horno, se interrumpe el flujo de aire caliente y el secado de las láminas	Motor dañado		7	3	4	84
	Aislamiento	Fibra aislante	Paredes externas aumentan de temperatura	Mayor pérdida de calor del horno	Afectación a la temperatura y consumo de energía del horno	Aislante deteriorado	Por el tiempo de uso o por acumulación de humedad	9	3	5	135

TABLA A7. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA, EFECTO Y SU CRITIRICIDAD PARA EL AISLAMIENTO DEL HORNO 2.

Función del elemento			**Modo de fallo potencial**	**Efecto potencial del fallo**		**Causa o mecanismo potencial del fallo**	**Detalle de la causa o mecanismo potencial del fallo**	**Severidad**	**Ocurrencia**	**Detección**	**NPR**
Sub sistema	**Conjunto**	**Componente**		**Efecto local**	**Efecto final**						
Aislamiento de la hornilla											
	Paredes aislantes	Fibra aislante	Paredes externas aumentan de temperatura	Mayor pérdida de calor del horno	La temperatura interna del horno se ve afectada, también aumenta el consumo de GLP	Degradación de la fibra aislante	Por el tiempo de uso	9	4	5	180
		Fibra aislante	Paredes externas aumentan de temperatura	Mayor pérdida de calor del horno	La temperatura interna del horno se ve afectada, también aumenta el consumo de GLP	Empapado del aislamiento y aceleración de la degradación de la fibra aislante	Humedad entrando en contacto con la fibra aislante	8	3	5	120
		Fibra aislante	Paredes externas aumentan de temperatura	Mayor pérdida de calor del horno	La temperatura interna del horno se ve afectada, también aumenta el consumo de GLP	Degradación de la fibra aislante	Golpes o abolladuras en las paredes	9	2	5	90
Aislamiento de pre-secado											
	Paredes aislantes	Fibra aislante	Paredes externas aumentan de temperatura	Mayor pérdida de calor del horno	La temperatura interna del horno se ve afectada, también aumenta el consumo de GLP	Degradación de la fibra aislante	Por el tiempo de uso	9	2	5	90

		Fibra aislante	Paredes externas aumentan de temperatura	Mayor pérdida de calor del horno	La temperatura interna del horno se ve afectada, también aumenta el consumo de GLP	Empapado del aislamiento y aceleración de la degradación de la fibra aislante	Humedad entrando en contacto con la fibra aislante	8	4	5	160
		Fibra aislante	Paredes externas aumentan de temperatura	Mayor pérdida de calor del horno	La temperatura interna del horno se ve afectada, también aumenta el consumo de GLP	Degradación de la fibra aislante	Golpes o abolladuras en las paredes	9	2	2	36
Aislamiento de secado											
	Paredes aislantes	Fibra aislante	Paredes externas aumentan de temperatura	Mayor pérdida de calor del horno	La temperatura interna del horno se ve afectada, también aumenta el consumo de GLP	Degradación de la fibra aislante	Por el tiempo de uso	9	3	5	135
		Fibra aislante	Paredes externas aumentan de temperatura	Mayor pérdida de calor del horno	La temperatura interna del horno se ve afectada, también aumenta el consumo de GLP	Empapado del aislamiento y aceleración de la degradación de la fibra aislante	Humedad entrando en contacto con la fibra aislante	8	3	5	120
		Fibra aislante	Paredes externas aumentan de temperatura	Mayor pérdida de calor del horno	La temperatura interna del horno se ve afectada, también aumenta el consumo de GLP	Degradación de la fibra aislante	Golpes o abolladuras en las paredes	9	2	2	36
Aislamiento de post - secado											
	Paredes aislantes	Fibra aislante	Paredes externas aumentan de temperatura	Mayor pérdida de calor del horno	La temperatura interna del horno se ve afectada, también aumenta el consumo de GLP	Degradación de la fibra aislante	Por el tiempo de uso	9	2	5	90
		Fibra aislante	Paredes externas aumentan de temperatura	Mayor pérdida de calor del horno	La temperatura interna del horno se ve afectada, también aumenta el consumo de GLP	Empapado del aislamiento y aceleración de la degradación de la fibra aislante	Humedad entrando en contacto con la fibra aislante	8	2	5	80
		Fibra aislante	Paredes externas aumentan de temperatura	Mayor pérdida de calor del horno	La temperatura interna del horno se ve afectada, también aumenta el consumo de GLP	Degradación de la fibra aislante	Golpes o abolladuras en las paredes	9	2	2	36

TABLA A8. EQUIPOS Y SENSORES REQUERIDOS PARA EL MONITOREO DE LA CONDICIÓN DEL AISLAMIENTO DE LA HORNILLA.

Equipo/sensor	Descripción	Aplicación	Cantidad	Imagen	Precio unitario		Precio total	
LM35	Sensor de temperatura	Medir temperatura externa de las paredes y ambiente	21		$2,95	₡1 961,75	$61,95	₡41 196,75
Arduino Mega 2560 R3	Microcontrolador	Interconexión entre los sensores y el ordenador	1		$59,95	₡39 866,75	$59,95	₡39 866,75
ESP8266	Módulo WIFI	Envío de datos	1		$8,95	₡5 951,75	$8,95	₡5 951,75
Cd4051BE	Multiplexor	Aumentar la cantidad de entradas	1		$1,15	₡764,75	$1,15	₡764,75
Ribbon Cable-10 wire	Cables de conexión	Conectar los componentes del sistema	2		$3,50	₡2 327,50	$7,00	₡4 655,00
80BGL102N	Protoboard	Conexión entre los equipos	1		$9,80	₡6 517,00	$9,80	₡6 517,00
Case para Arduino mega	Encapsulado acrílico	Protección del microcontrolador	1		$7,95	₡5 286,75	$7,95	₡5 286,75
Total							$156,75	₡104 238,75

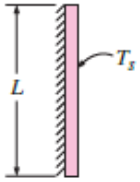
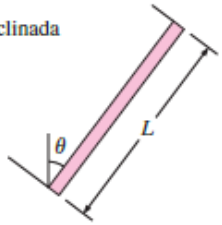
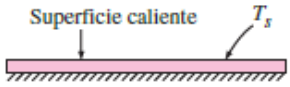
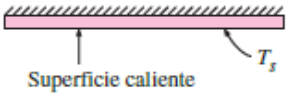
Configuración geométrica	Longitud característica L_c	Intervalo de Ra	Nu
Placa vertical 	L	10^4-10^9 $10^{10}-10^{13}$ Todo el intervalo	$Nu = 0.59Ra_L^{1/4}$ **(9-19)** $Nu = 0.1Ra_L^{1/3}$ **(9-20)** $Nu = \left\{0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1+(0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2$ **(9-21)** (compleja pero más exacta)
Placa inclinada 	L		Utilícense las ecuaciones de la placa vertical para la superficie superior de una placa fría y la superficie inferior de una placa caliente Reemplácese g por $g\cos\theta$ para $0 < \theta < 60°$
Placa horizontal (Área superficial A y perímetro p) *a*) Superficie superior de una placa caliente (o superficie inferior de una placa fría)  *b*) Superficie inferior de una placa caliente (o superficie superior de una placa fría) 	A_s/p	10^4-10^7 10^7-10^{11} 10^5-10^{11}	$Nu = 0.54Ra_L^{1/4}$ **(9-22)** $Nu = 0.15Ra_L^{1/3}$ **(9-23)** $Nu = 0.27Ra_L^{1/4}$ **(9-24)**

Figura A6. Longitud característica y número de Nusselt para la convección natural. Fuente: Çengel y Ghajar (2011).

Temp., T, °C	Densidad, ρ, kg/m^3	Calor específico, c_p, J/kg · K	Conductividad térmica, k, W/m · K	Difusividad térmica, α, m^2/s^2	Viscosidad dinámica, μ, kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν, m^2/s	Número de Prandtl, Pr
−150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
−100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
−50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
−40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
−30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
−20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
−10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Figura A7. Propiedades del aire a diferentes temperaturas. Fuente: Çengel y Ghajar (2011).

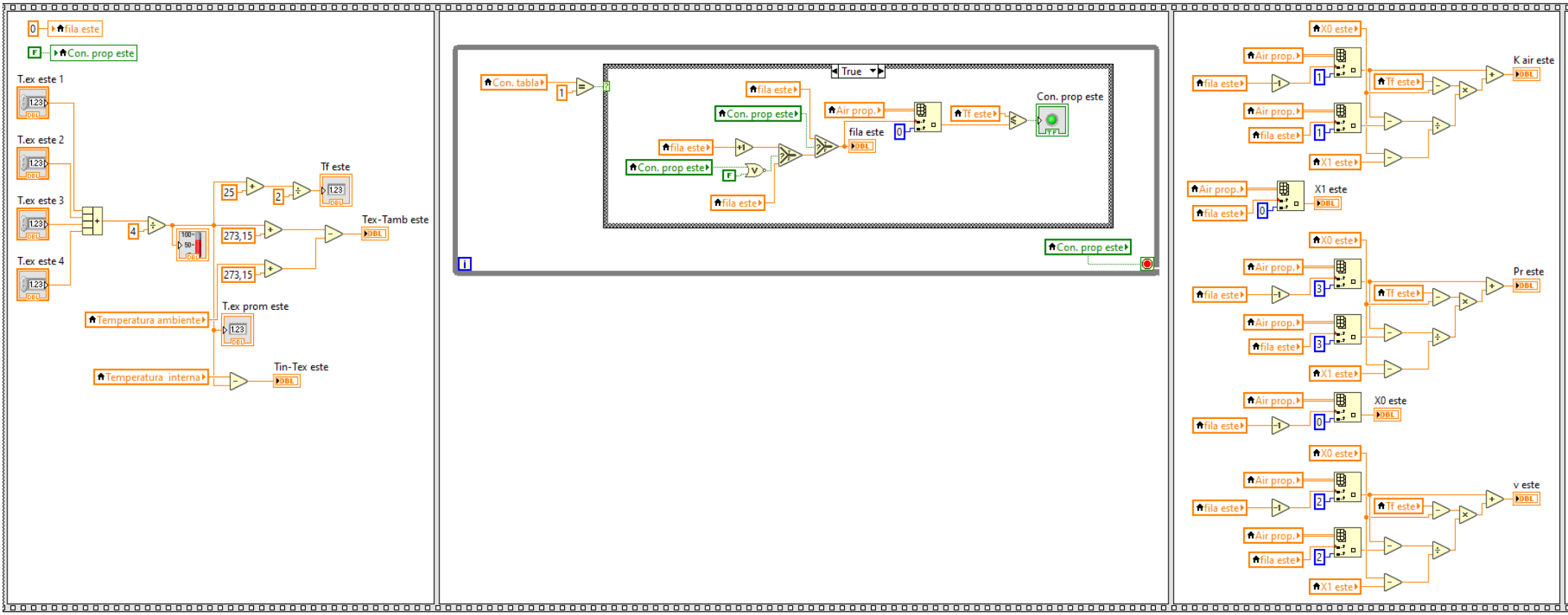


Figura A8. Primera sección de código para la pared este. Fuente: Elaboración propia.

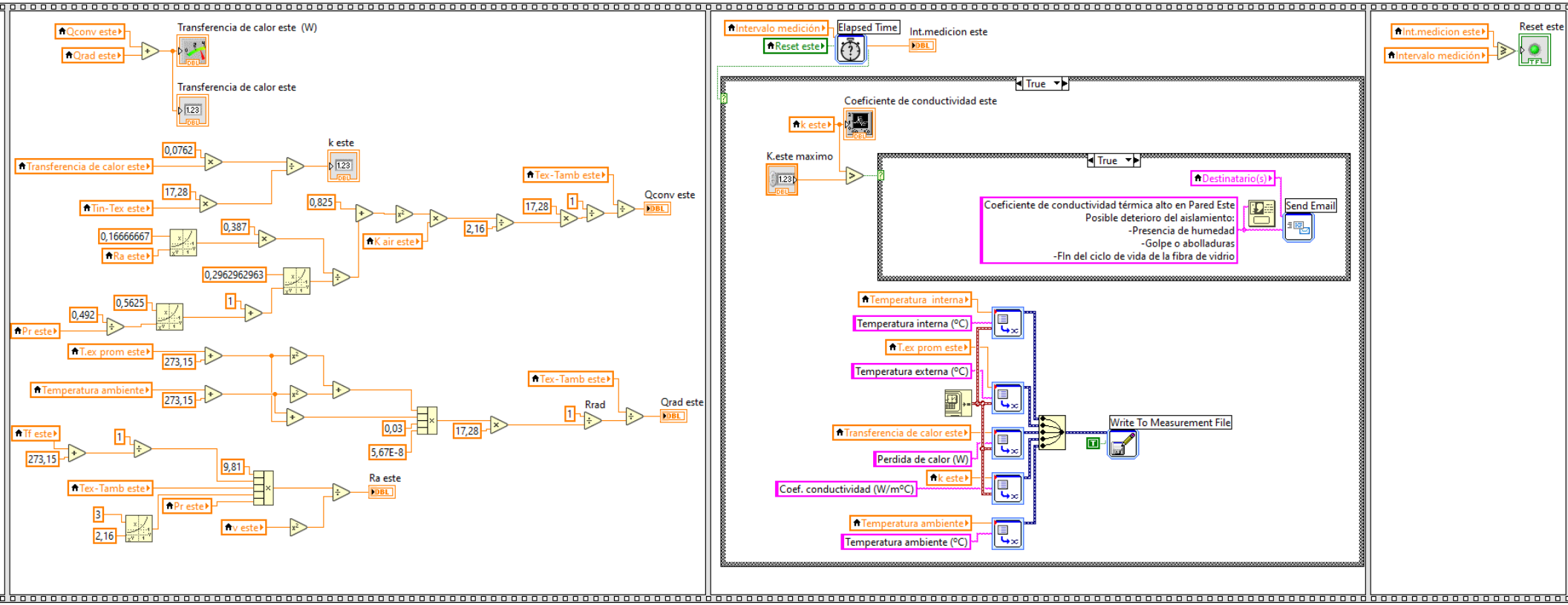


Figura A9. Segunda sección de código para la pared este. Fuente: Elaboración propia.

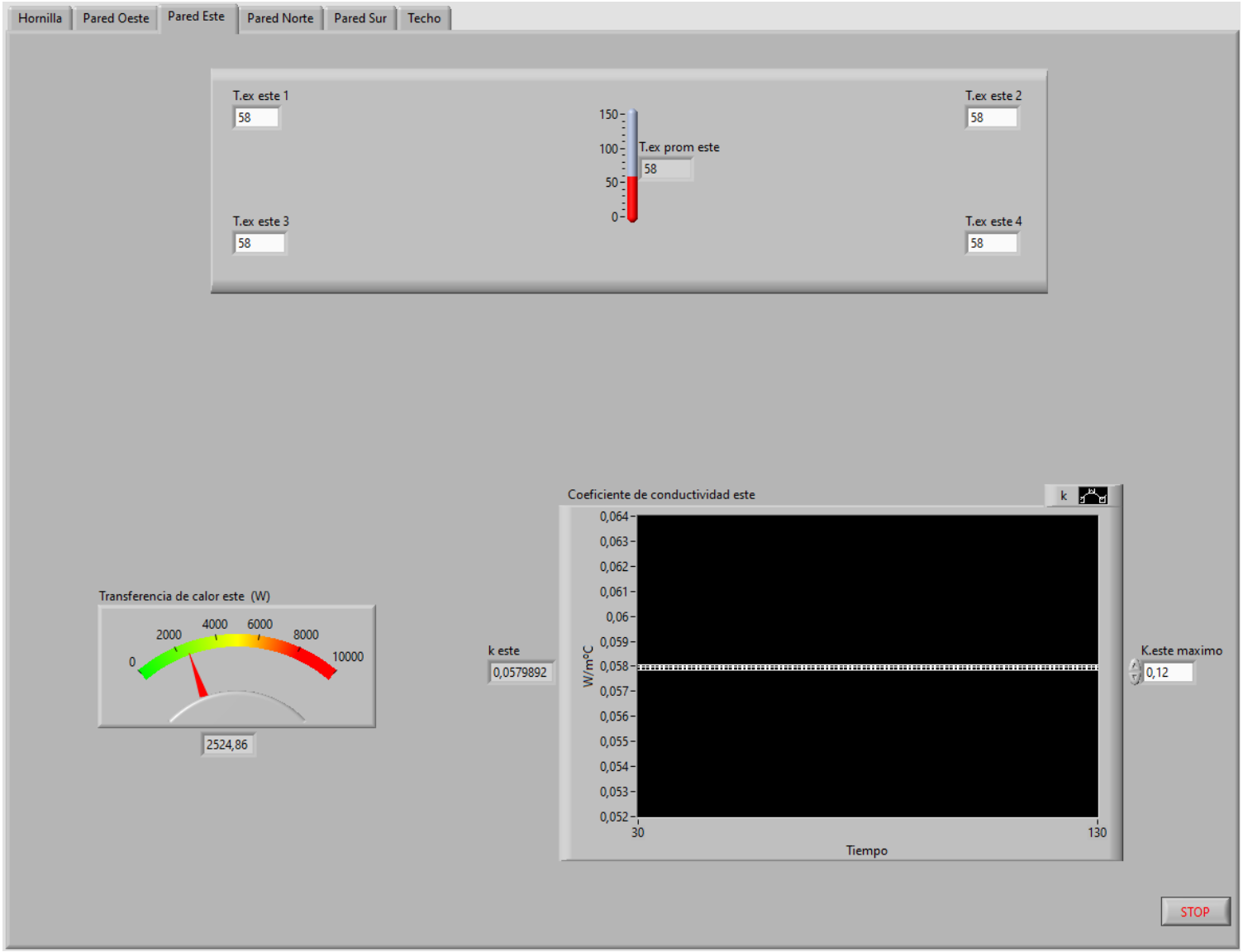


Figura A10. Interfaz para la pared este. Fuente: Elaboración propia.

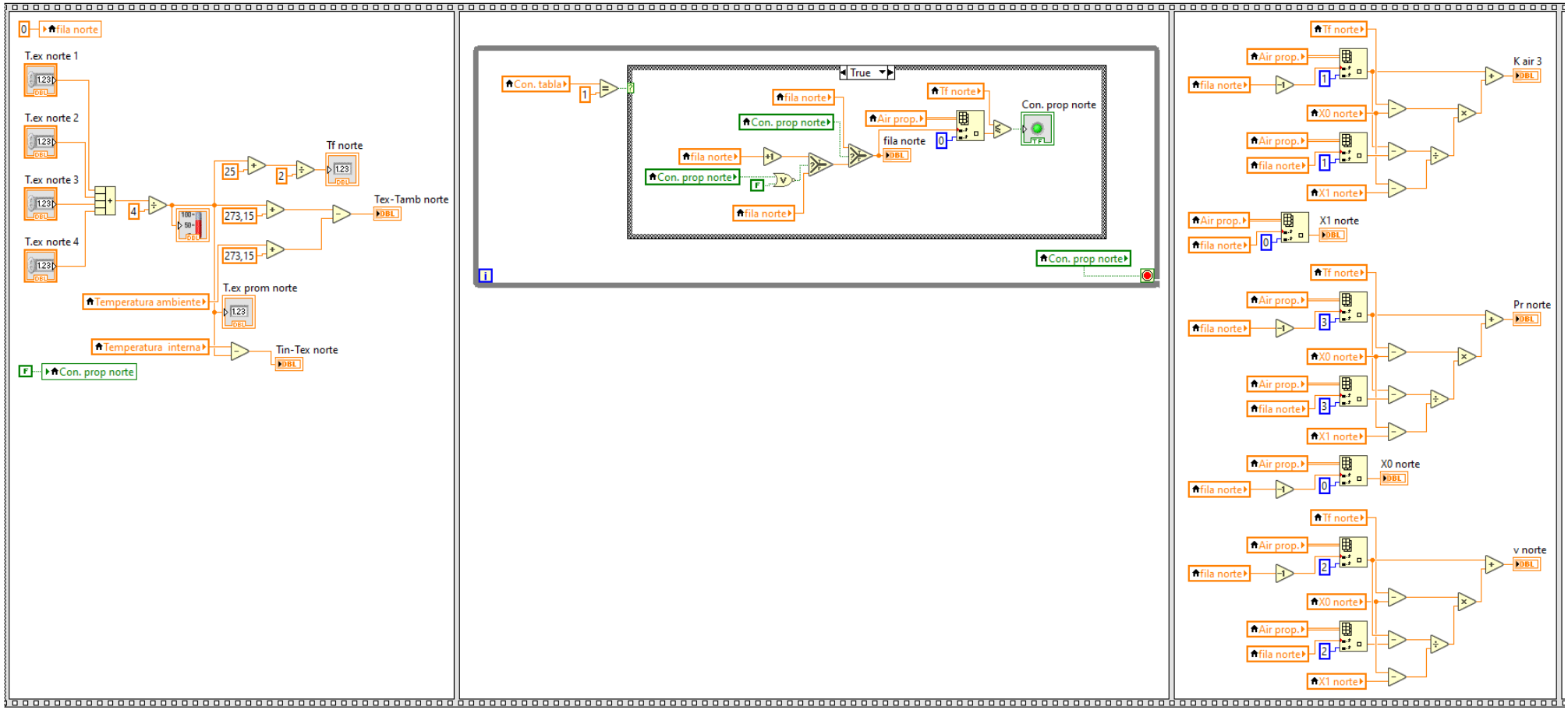


Figura A11. Primera sección de código para la pared norte. Fuente: Elaboración propia.

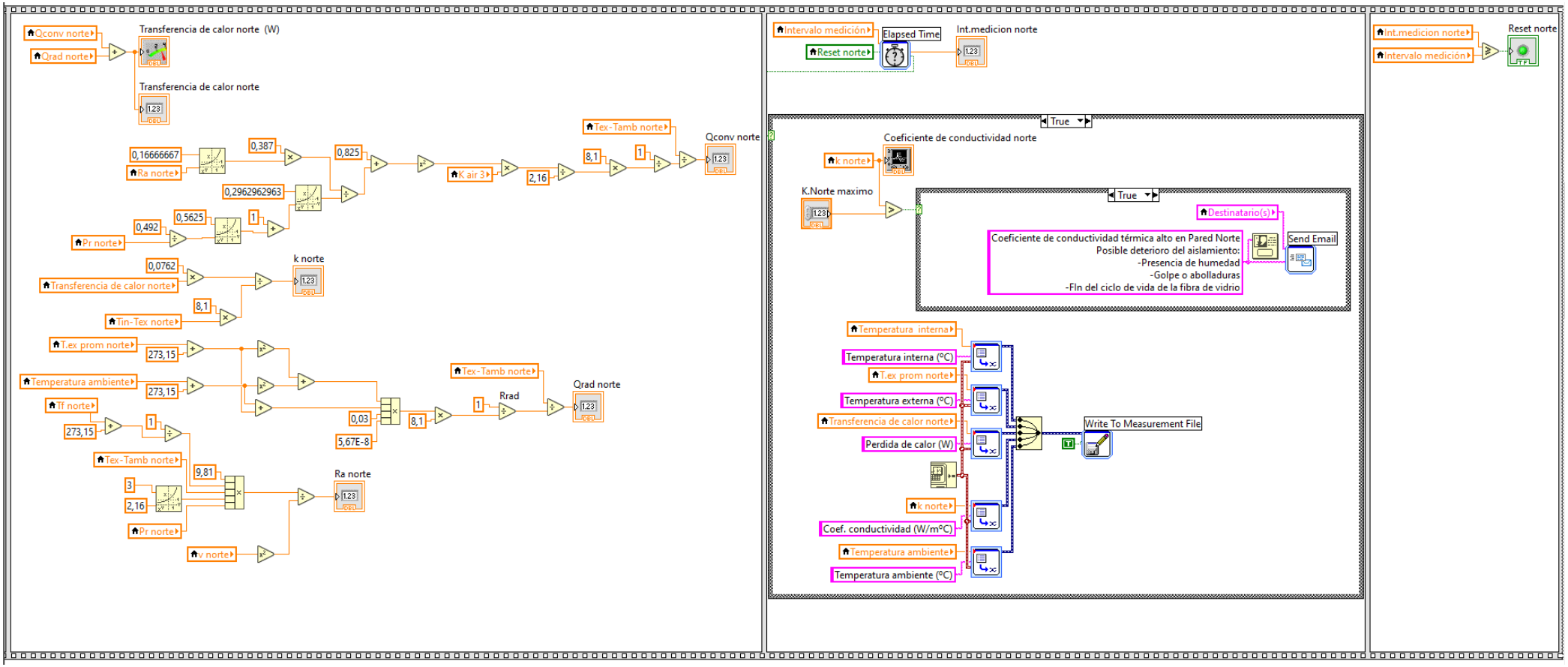


Figura A12. Segunda sección de código para la pared norte. Fuente: Elaboración propia.

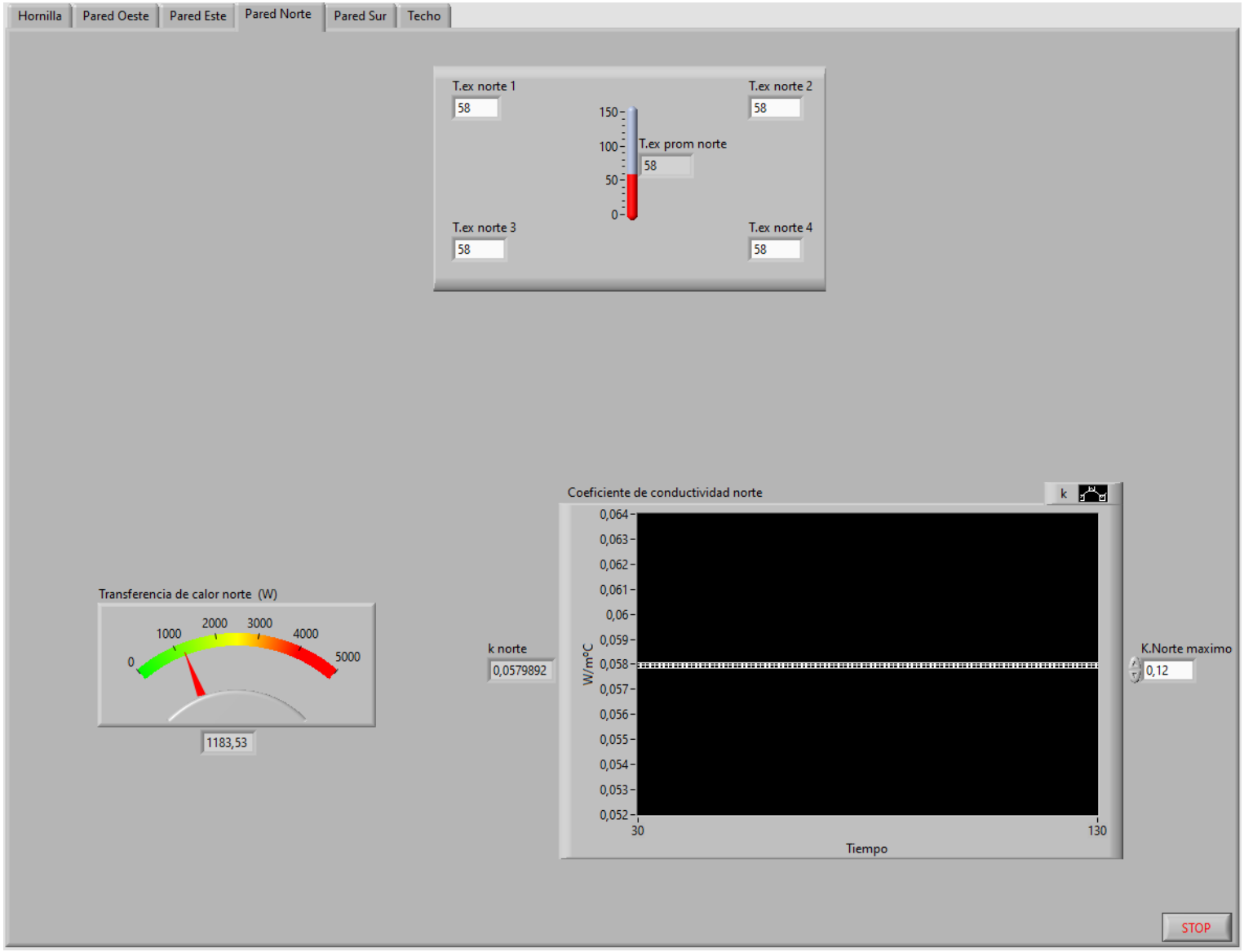


Figura A13. Interfaz para la pared norte. Fuente: Elaboración propia.

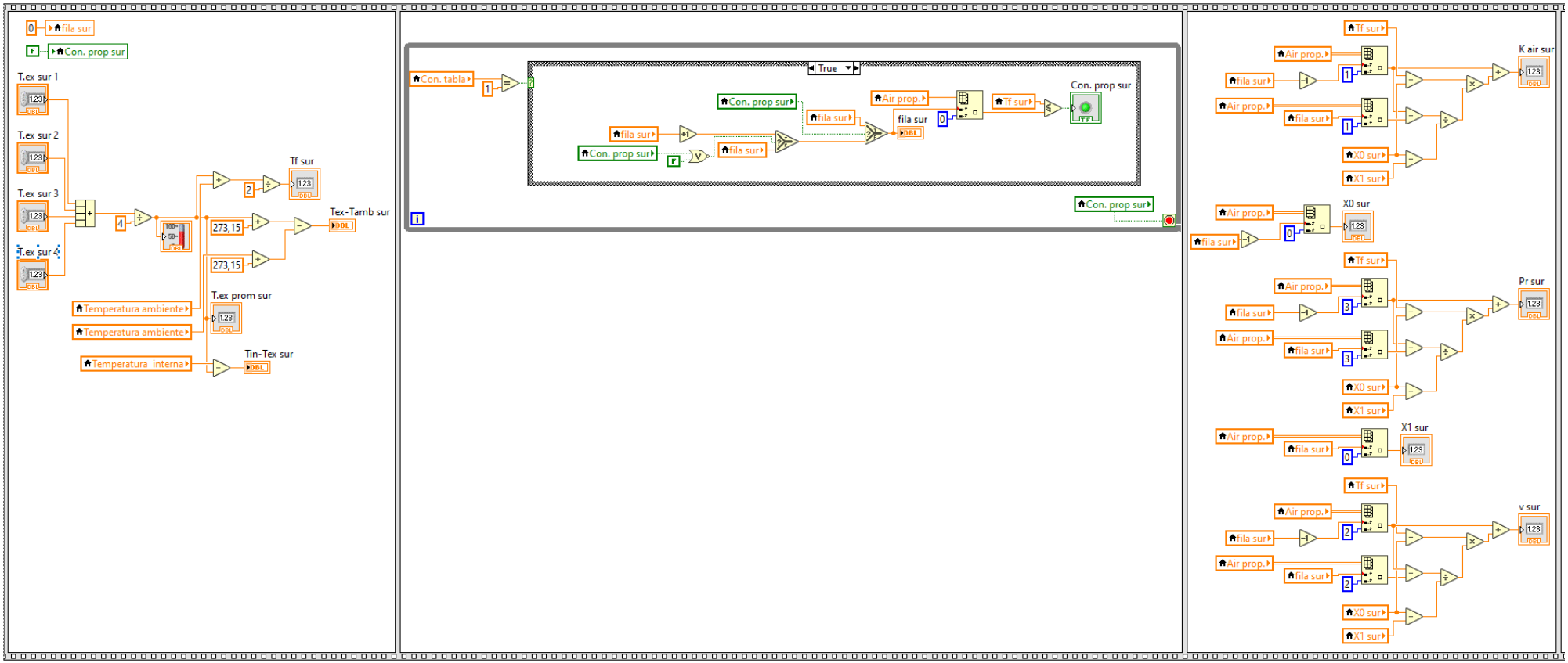


Figura A14. Primera sección de código para la pared sur. Fuente: Elaboración propia.

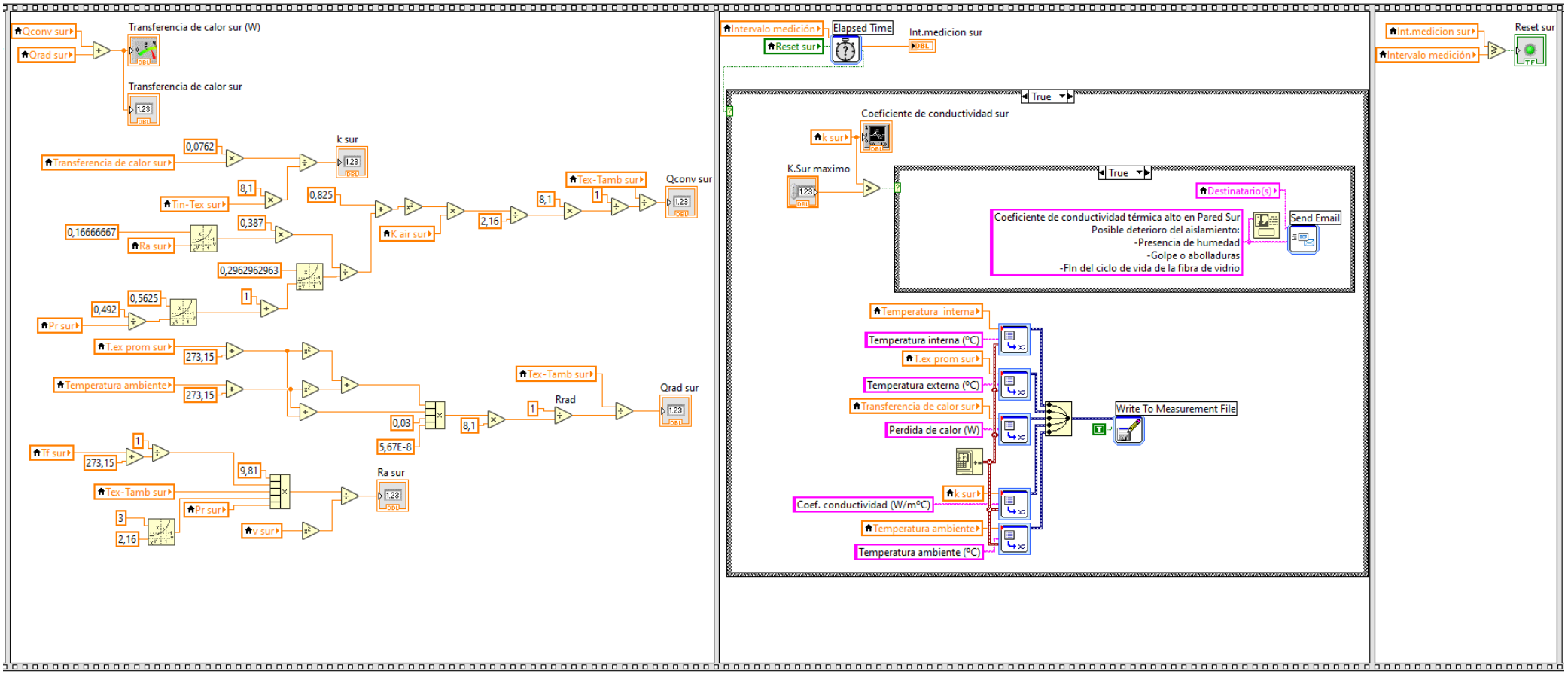


Figura A15. Segunda sección de código para la pared sur. Fuente: Elaboración propia.

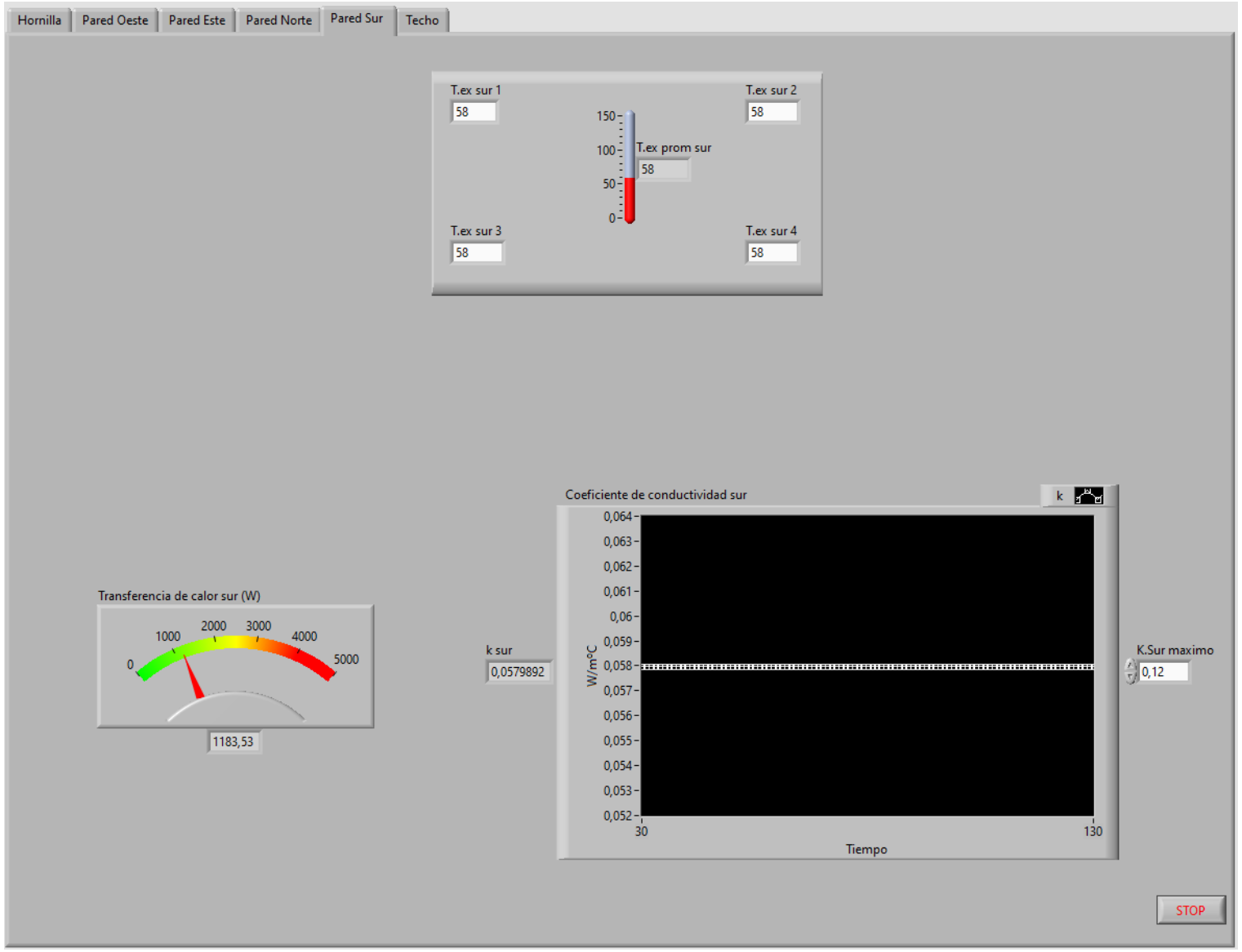


Figura A16. Interfaz para la pared sur. Fuente: Elaboración propia.

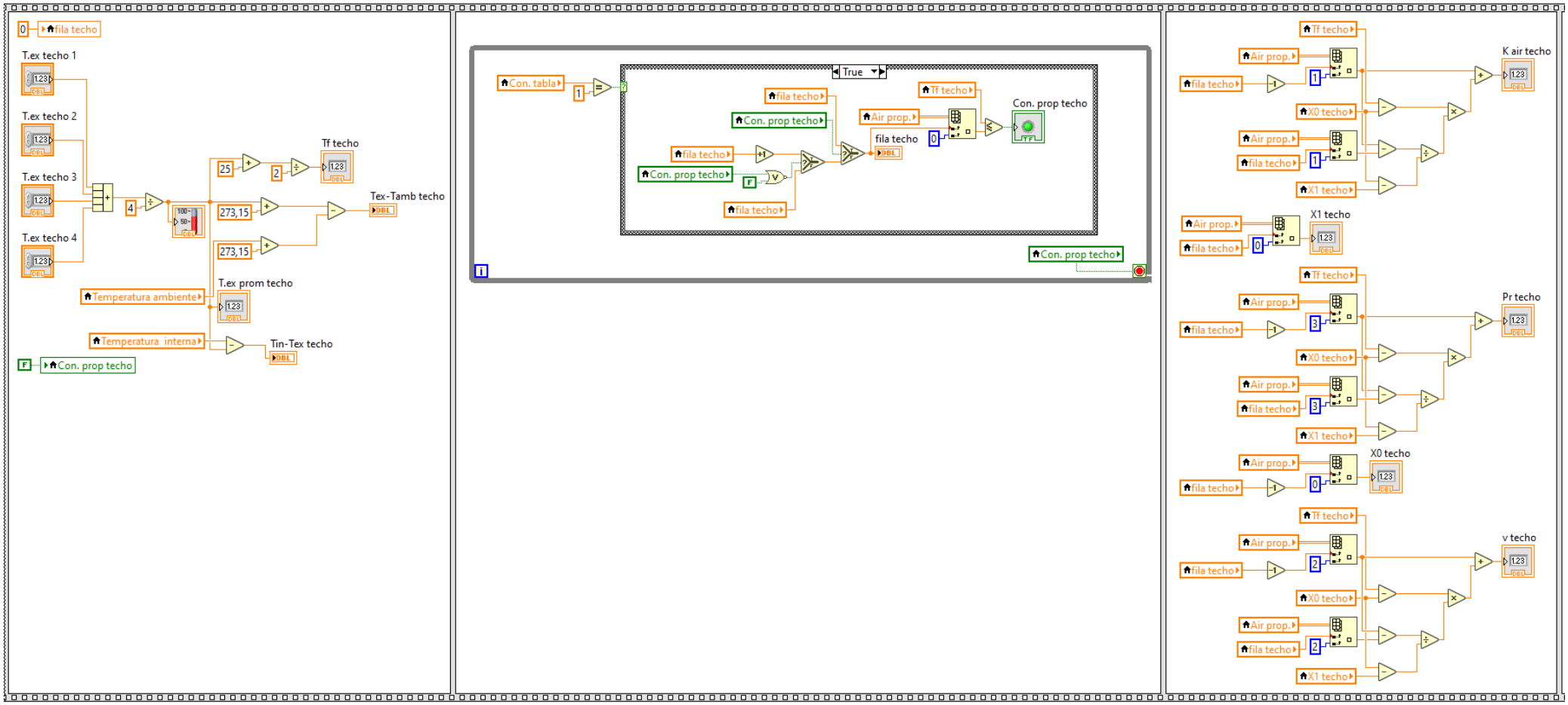


Figura A17. Primera sección de código para el techo. Fuente: Elaboración propia.

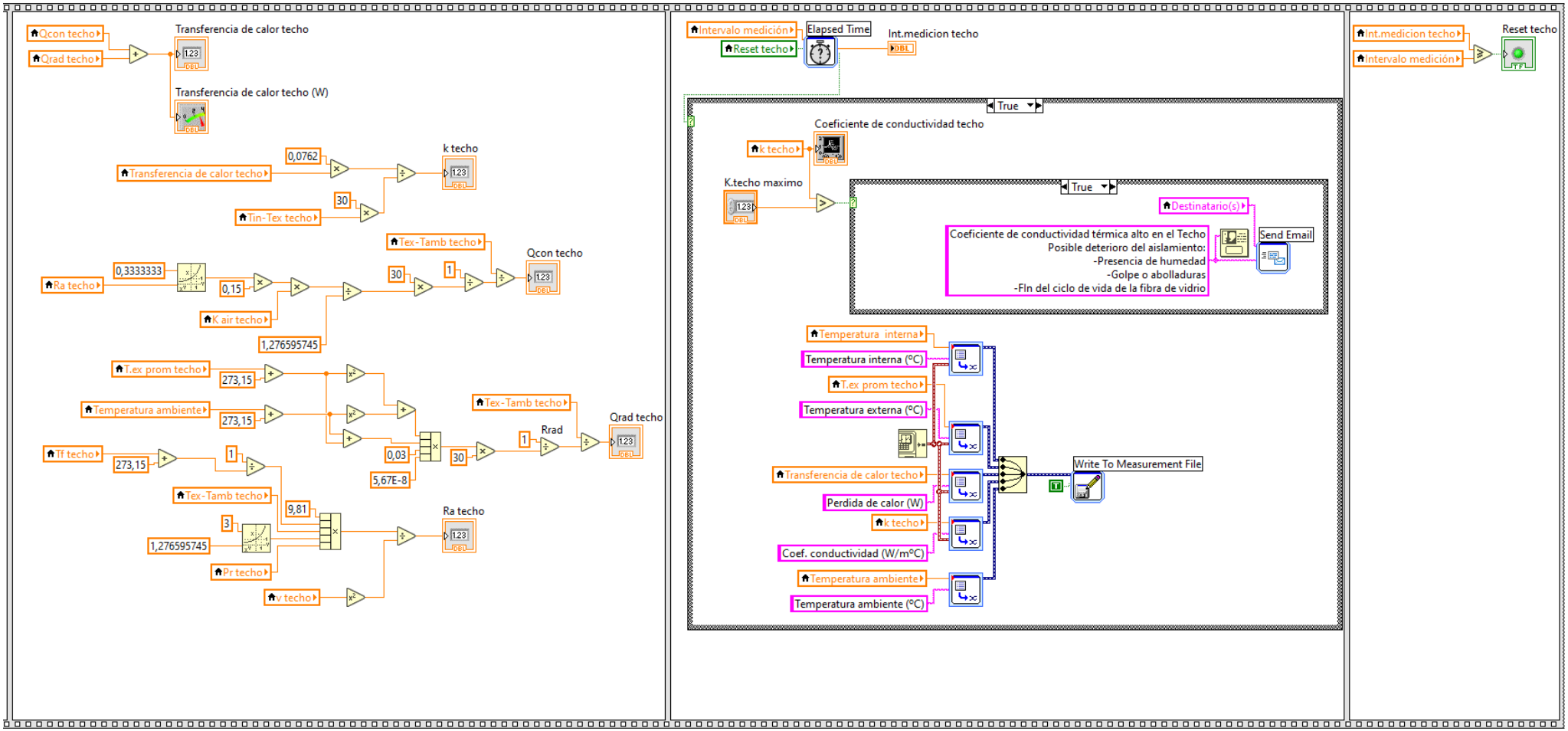


Figura A18. Segunda sección de código para el techo. Fuente: Elaboración propia.

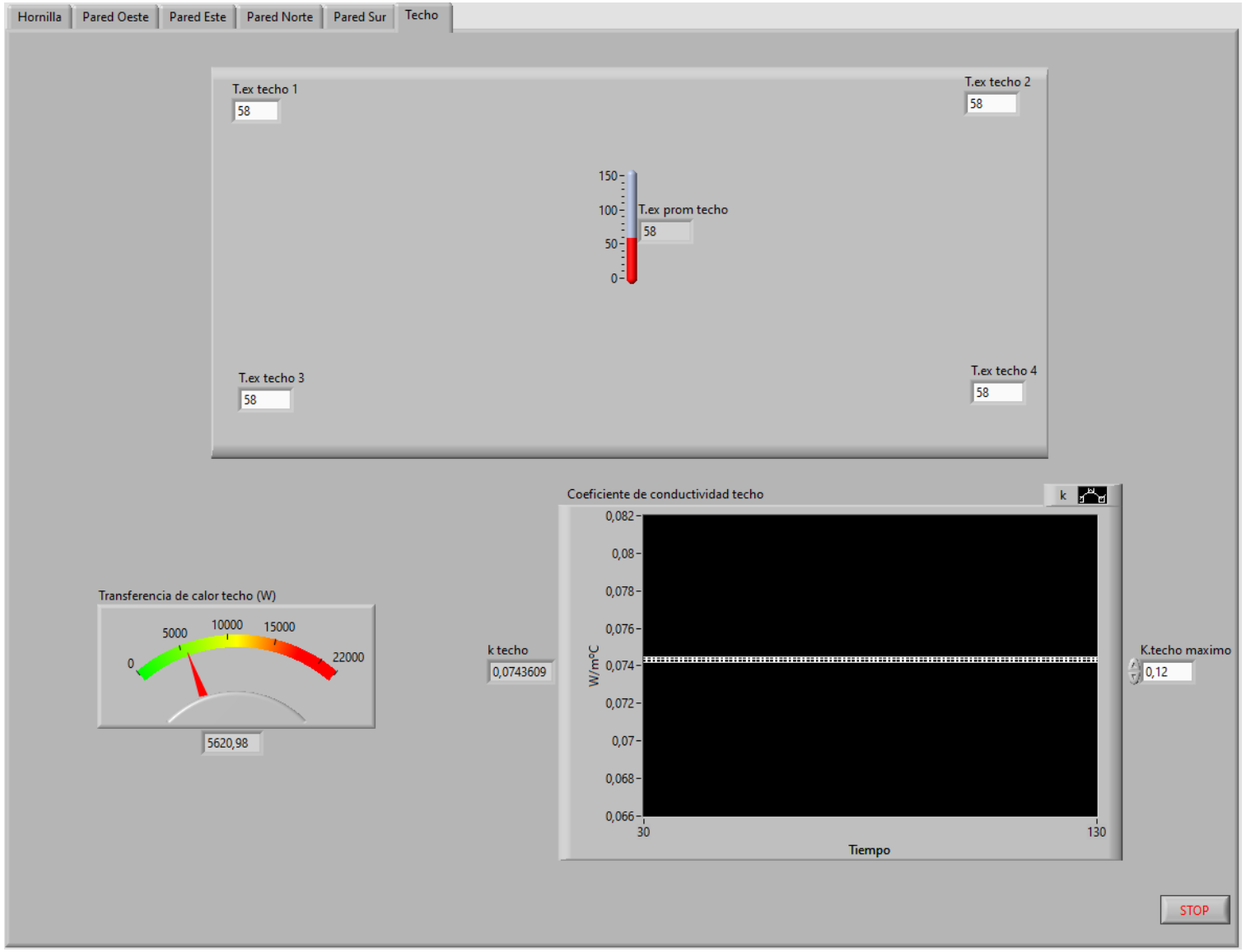


Figura A19. Interfaz para el techo. Fuente: Elaboración propia.

Figura A20. Cotización de los quipos necesarios para el prototipo para el monitoreo de la condición. Fuente: MicroJPM (2022).

Acomodador de parqueos (no chófer)	TONC	¢10.875,12	Contador privado*	Lic.	¢696.873,72	Laboratorista civil	TOC	¢12.139,07
Acompañante en buseta escolar	TONC	¢10.875,12	Copiloto (Primer Oficial de Aviación)	TES	¢22.044,91	Laboratorista clínico	TOC	¢12.139,07
Agente de aduanas	TES	¢22.044,91	Cortador de piezas tela (patrones)	TOC	¢12.139,07	Lavador y encerador de carros	TONC	¢10.875,12
Agente de ventas *	TOCG	¢367.058,75	Cosedor piezas (prendas a máquina)	TOC	¢12.139,07	Limpiador de piscinas (sin químicos)	TONC	¢10.875,12
Albañil	TOC	¢12.139,07	Costurera (Modista)	TOE	¢14.205,13	Limpiador de tanques sépticos	TOC	¢12.139,07
Alistador automotriz (lijador)	TOSC	¢11.825,90	Counter (Vendedor de pasajes) *	TOCG	¢367.058,75	Llantero	TOSC	¢11.825,90
Analista de crédito *	TOCG	¢367.058,75	Dealer (Distribuidor de cartas)	TONC	¢10.875,12	Locutor de radioemisora	TOE	¢14.205,13
Animador de eventos	TOC	¢12.139,07	Discjokey (Pone discos)	TONC	¢10.875,12	Locutor de televisión	TES	¢22.044,91
Aplanchador con equipo de vapor	TOC	¢12.139,07	Demostrador (display)	TONC	¢10.875,12	Luminotécnico de televisión	TES	¢22.044,91
Aserrador (usa sierra de motor)	TOC	¢12,139,07	Demostrador-vendedor	TOSC	¢11.825,90	Maestro de obras (Construcción)	TOE	¢14.205,13
Asistente de abogacía *	TOEG	¢416.801,68	Dependiente	TOSC	¢11.825,90	Maitre (jefe de meseros)	TOE	¢14.205,13
Asistente de consultorio médico	TOC	¢12.139,07	Despachador de vuelo	TES	¢22.044,91	Manicurista; Maquillador	TOC	¢12.139,07
Asistente domicilio de ancianos **(Cuidados especiales)**	TOE	¢14.205,13	Diagramador en artes gráficas Dibujante Ingeniería, Arquitectura *	TOE TOCG	¢14.205,13 ¢367.058,75	Masajista Mantenimiento correctivo de cómputo	TOC TOE	¢12.139,07 ¢14.205,13
Auxiliar agente de aduanas	TOE	¢14.205,13	Digitador	TOC	¢12.139,07	Mantenimiento de edificios	TOC	¢12.139,07
Auxiliar de contabilidad *	TOCG	¢367.058,75	Ebanista	TOE	¢14.205,13	Mantenimiento preventivo de cómputo	TOC	¢12.139,07
Auxiliar dental	TOE	¢14.205,13	Educador aspirante sin título *	TOEG	¢416.801,68	Mecánico de calderas (Mantenimiento)	TOE	¢14.205,13
Ayudante de cocina	TOSC	¢11.825,90	Electricista	TOC	¢12.139,07	Mecánico general	TOC	¢12.139,07
Ayudante en mecánica general	TOSC	¢11.825,90	Electromecánico	TOE	¢14.205,13	Mecánico precisión	TOE	¢14.205,13
Ayudante de operario, construcción	TOSC	¢11.825,90	Empacador, etiquetador (manual)	TONC	¢10.875,12	Mecánico máquinas de coser industrial	TOE	¢14.205,13
Baqueano	TOSC	¢11.825,90	Empleado de despacho	TOSC	¢11.825,90	Mensajero *	TONCG	¢326.253,57
Barbero	TOC	¢12.139,07	Empleada doméstica *		¢214.230,78	Misceláneo *	TONCG	¢326.253,57
Barista	TOC	¢12.139,07	Encuestador *	TOSCG	¢351.965,23	Misceláneo hogares de la tercera edad	TONC	¢10.875,12
Bodeguero (Encargado) *	TOSCG	¢351.965,23	Enderezador automotriz	TOC	¢12.139,07	Monitoreador de cámaras de vídeo*	TOSCG	¢351.965,23
Bodeguero (Peón) *	TONCG	¢326.253,57	Escaneador inventarios (hand held)*	TOSCG	¢351.965,23	Montacarguista	TOSC	¢11.825,90
Cajero *	TOCG	¢367.058,75	Esteticista	TOE	¢14.205,13	Mucama	TONC	¢10.875,12
Camarero	TONC	¢10.875,12	Estibador por kilo frutas y vegetales		¢0,0746	Niñera, excepto en el hogar del niño	TONC	¢10.875,12
Camarógrafo de prensa	TES	¢22.044,91	Estibador por movimiento		¢393,99	Niñera en el hogar del niño		¢214.230,78
Cantante	TOC	¢12.139,07	Estibador por tonelada		¢92,39	**(Servicio doméstico)** *		
Cantinero	TOSC	¢11.825,90	Estilista	TOC	¢12.139,07	Oficinista (General) *	TOSCG	¢351.965,23
Capitán de embarcación	TOE	¢14.205,13	Estilista canino (Grommer)	TOSC	¢11.825,90	Operador de cabina de radioemisora	TOE	¢14.205,13
Cargador cilindros gas y extintores	TOSC	¢11.825,90	Florista	TOC	¢12.139,07	Operador de "araña" (Serigrafía)	TOC	¢12.139,07
Carnicero empleado de despacho	TOSC	¢11.825,90	Fontanero	TOC	¢12.139,07	Operador de caldera	TOC	¢12.139,07
Carnicero destazador	TOC	¢12.139,07	Fotocopiador (Centro fotocopiado)	TOSC	¢11.825,90	Operador de draga	TOE	¢14.205,13
Carpintero	TOC	¢12.139,07	Fotógrafo de prensa	TOE	¢14.205,13	Operador de grúa estacionaria	TOE	¢14.205,13
Catador	TOE	¢14.205,13	Fresador (Metalmecánica)	TOE	¢14.205,13	Operador de maquinaria pesada	TOC	¢12.139,07
Cerrajero	TOC	¢12.139,07	Fumigador en casas y edificios	TOSC	¢11.825,90	Operador de radio-taxi	TOC	¢12.139,07
Chapulinero	TOC	¢12.139,07	Futbolista Primera División	TOE	¢14.205,13	Operario en construcción	TOC	¢12.139,07
Chef	TOE	¢14.205,13	Futbolista Segunda División	TOC	¢12.139,07	Operario de talleres dentales	TOC	¢12.139,07
Chequeador de buses	TONC	¢10.875,12	Gestor de redes sociales (Comunity		¢14.205,13	Ordeñador a mano	TONC	¢10.875,12
Cobrador *	TOSCG	¢351.965,23	Manager, diseña artes finales)	TOE		Panadero	TOC	¢12.139,07
Cocinero	TOC	¢12.139,07	Gestor de redes sociales (Comunity	TOSCG	¢351.965,23	Parrillero	TOSC	¢11.825,90
Coctelero (Bartender o Barwoman)	TOC	¢12.139,07	manager, monitorea y da respuesta).*			Pastelero	TOC	¢12.139,07
Conductor ambulancia (socorrismo)	TOC	¢12.139,07	Gestor redes sociales (Comunity manager,	TOC	¢12.139,07	Pelador de camarón	TONC	¢10.875,12
Conductor de bus (no cobra)	TOC	¢12.139,07	lleva datos y los interpreta).			Peón agrícola (labores manuales)	TONC	¢10.875,12
Conductor de bus (cobrador)	TOE	¢14.205,13	Gondolero	TONC	¢10.875,12	Peón agrícola (motoguadañas, etc.)	TOSC	¢11.825,90
Conductor de tráiler	TOE	¢14.205,13	Guarda *	TOSCG	¢351.965,23	Peón de carga y descarga	TONC	¢10.875,12
Conductor de vehículo liviano	TOSC	¢11.825,90	Guarda custodia valores y portavalores*	TOCG	¢367.058,75	Peón de construcción	TONC	¢10.875,12
Conductor de vehículo pesado	TOC	¢12.139,07	Guía de turismo	TOC	¢12.139,07	Peón de jardín (labores manuales)	TONC	¢10.875,12
Conductor microbús (menos 11 pasaj.)	TOSC	¢11.825,90	Hojalatero	TOC	¢12.139,07	Peón de jardín (motoguadaña, etc.)	TOSC	¢11.825,90
Conserje *	TONCG	¢326.253,57	Instalador vidrios (corta, pone marcos)	TOC	¢12.139,07	Peón de embarcación	TONC	¢10.875,12
Contador privado *	TMED	¢384.651,40	Instructor de bailes	TOC	¢12.139,07	Pilero (lavador de platos)	TONC	¢10.875,13
Contador privado *	DES	¢511.981,50	Instructor de gimnasio (sin título)	TOC	¢12.139,07	Pintor automotriz	TOE	¢14.205,13
Contador privado *	Bach.	¢580.708,20	Joyero	TOC	¢12.139,07	Pintor de brocha gorda	TOC	¢12,139,07

Figura A21. Salarios para el sector privado. Fuente: Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (2021).