

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**MÓDULO DE CALIBRACIÓN REMOTA PARA EQUIPOS
TRANSMISORES DE CONSISTENCIA BTG**

Trabajo de Titulación para
optar al Título de Técnico
Universitario en MANTENIMIENTO
INDUSTRIAL

Alumno:

Javier Ignacio Gaete
Hernández

Profesor Guía:

Mg. Ing. Carlos Baldi
González

Resumen

KEYWORDS: calibración remota, transmisores de consistencia BTG, Raspberry Pi, industria papelera, CMPC, conectividad 4G, optimización de procesos.

Este trabajo aborda la problemática que se presenta en la calibración de los sensores de consistencia de la densidad de la celulosa en las plantas industriales que producen esta materia prima. Estos equipos instalados en áreas de difícil acceso y sumado a la escasez de especialistas que están capacitados para realizar la respectiva calibración de estos sensores. Debido a esto se producen prolongados tiempos de inactividad debido a la dependencia de la industria chilena a un reducido grupo capacitado para realizar esta mantención.

La razón detrás de la implementación de este proyecto surge bajo la necesidad de modernizar este proceso para evitar depender de intervenciones presenciales para realizar la calibración de los sensores y poder realizar calibraciones precisas desde cualquier parte del mundo y cumplir de mejor manera los estándares de calidad requeridos por la industria de la celulosa.

Como solución se propone crear un módulo que permita la calibración remota de los sensores de la empresa BTG en base a una Raspberry PI y protegiendo la estructura con una carcasa industrial con protección IP55 que se adapte a las condiciones que se pueden presentar en el entorno complejo del proceso de producción de la celulosa.

Como resultado se obtuvo tras la implementación en la planta CMPC Maule un dispositivo efectivo para reducir de forma significativa los tiempos de calibración, además de reducir costos operativos y mejorar la precisión de este proceso industrial.

Índice de contenido

1.	ANTECEDENTES GENERALES.....	3
1.1	ANTECEDENTES DE LAS EMPRESAS.....	5
1.1.1	BTG.....	5
1.1.2	CMPC.....	6
1.1.2	TAI.....	6
1.2	PROBLEMÁTICA.....	7
1.3	CALIBRACIÓN DE EQUIPOS DE INSTRUMENTACIÓN DE FORMA REMOTA	8
1.4	VISIÓN GENERAL SOBRE LOS EQUIPOS DE INSTRUMENTACIÓN BTG	9
1.4.1	Equipos transmisores de consistencia BTG	10
1.5	PLATAFORMA MODULAR DE CALIBRACIÓN (CPM).....	11
1.5.1	Datos de la transmisión de CPM	12
1.6	RASPBERRY PI.....	13
1.6.1	Raspberry en la digitalización industrial	14
1.6.2	Implementación industrial de la raspberry	15
1.7	MODEM 4G PARA CONECTIVIDAD INDUSTRIAL	15
1.8	SOFTWARE REQUERIDO	16
1.8.1	Wine.....	16
1.8.2	Box86	17
1.8.3	AnyDesk.....	17
1.8.4	CPMwin.exe.....	17
2.	DISEÑO Y DESARROLLO DEL MÓDULO	19
2.1	CONCEPTUALIZACIÓN DEL DISEÑO	20
2.2	ASPECTOS FUNCIONALES DEL MÓDULO.....	20
2.3	COMPONENTES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO	21
2.3.1	Raspberry Pi 4 Modelo B	21
2.3.2	Caja de Estanca Sobrepuesta IP 55 con Placa de Montaje	22

2.3.3	<i>Carcasas para Raspberry Pi 4</i>	22
2.3.4	<i>Modem Huawei USB 4G Plug and Play</i>	22
2.3.5	<i>Tarjeta SIM 4G</i>	22
2.3.6	<i>Riel DIN</i>	22
2.3.7	<i>Otros Componentes</i>	22
2.4	DIMENSIONADO DEL MÓDULO	23
2.4.1	<i>Módulo Completo</i>	23
2.4.2	<i>Raspberry Pi 4</i>	23
2.4.3	<i>Carcasa con Riel DIN</i>	23
2.5	INTEGRACIÓN MÓDULO/MÁQUINA	24
2.6	PUNTOS CLAVE DEL MÓDULO DE CALIBRACIÓN REMOTA	25
2.6.1	<i>Equipos de instrumentación BTG</i>	25
2.6.2	<i>Raspberry Pi</i>	26
2.6.3	<i>AnyDesk</i>	26
2.6.4	<i>PC del mantenedor</i>	26
2.6.5	<i>Reinicio automático</i>	26
2.7	INTEGRACIÓN DEL MÓDULO CON EL SENSOR DE CONSISTENCIA	26
2.7.1	<i>Conexión física</i>	27
2.7.2	<i>Conectividad a internet</i>	27
2.7.3	<i>Compatibilidad de software y emulación</i>	27
2.7.4	<i>Especificaciones de alimentación eléctrica</i>	27
2.7.5	<i>Procedimiento de configuración y calibración</i>	28
2.8	ADQUISICIÓN DE INSUMOS	28
2.9	PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO	29
2.9.1	<i>Montaje de Disipadores en la Raspberry Pi</i>	29
2.9.2	<i>Modificación de la carcasa</i>	30
2.9.3	<i>Montaje del ventilador</i>	30
2.9.4	<i>Montaje de la Raspberry Pi en la carcasa</i>	31
2.9.5	<i>Conexión del ventilador al GPIO de la Raspberry Pi</i>	32
2.9.6	<i>Ensamblaje de la carcasa</i>	32
2.9.7	<i>Configuración del modem y chip 4G</i>	33
2.9.8	<i>Conexión de dispositivos a la Raspberry Pi</i>	33
2.9.9	<i>Cableado y montaje en la caja estanca</i>	34
2.9.10	<i>Finalización del montaje</i>	35
2.10	INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE	36
2.10.1	<i>Configuración inicial</i>	36

2.10.2	<i>Preparación inicial.....</i>	37
2.10.3	<i>Herramientas de instalación</i>	37
2.10.4	<i>Selección del SO.....</i>	37
2.10.5	<i>Descarga de Raspberry Pi OS</i>	38
2.10.6	<i>Instalación en tarjeta Micro SD.....</i>	38
2.10.7	<i>Selección del SO en el gestor.....</i>	38
2.10.8	<i>Incorporación del SO personalizado.....</i>	39
2.10.9	<i>Identificación de Almacenamiento.....</i>	41
2.10.10	<i>Proceso de escritura.....</i>	42
2.10.11	<i>Finalización y ejecución.....</i>	42
2.10.12	<i>Inicialización de Raspberry Pi.....</i>	43
2.10.13	<i>Establecimiento de parámetros regionales.....</i>	44
2.10.14	<i>Configuración de acceso</i>	44
2.10.15	<i>Configuración de red Wi-Fi.....</i>	45
2.10.16	<i>Actualización del sistema.....</i>	45
2.10.17	<i>Reinicio post-configuración.....</i>	46
2.10.18	<i>Acceso a la terminal.....</i>	46
2.10.19	<i>Actualización preliminar</i>	46
2.10.20	<i>Actualización del sistema.....</i>	47
2.10.21	<i>Instalación de Box86</i>	47
2.10.22	<i>Instalación de Wine.....</i>	48
2.10.23	<i>Instalación de AnyDesk</i>	48
2.10.24	<i>Instalación de wincpm.exe</i>	49
2.10.25	<i>Automatización de la ejecución de CpmWin.exe en Raspberry Pi</i>	50
2.11	CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO PARA OPERACIÓN ININTERRUMPIDA	51
2.12	AUTOMATIZACIÓN DE APLICACIONES EN EL INICIO	51
2.13	ACTUALIZACIÓN Y MANEJO DE EEPROM EN RASPBERRY PI	51
2.13.1	<i>Optimización para calibración en tiempo real</i>	52
3.	PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO E INSTALACIÓN.	54

3.1	PRUEBA DE CONEXIÓN	55
3.2	PRUEBA DE CONCORDANCIA DE CONSISTENCIA	58
3.3	PRUEBA DE CALIBRACIÓN REMOTA.....	61
3.4	CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS PRELIMINARES	64
3.5	INSTALACIÓN DEL MÓDULO EN CMPC MAULE	64
3.6	LIMITACIONES DEL MÓDULO Y PROPUESTA DE MEJORA.....	64
3.6.1	<i>Identificación de la limitación principal del módulo.....</i>	<i>65</i>
3.6.2	<i>Propuesta para la historización continua de parámetros de consistencia.....</i>	<i>66</i>
3.6.3	<i>Ventajas proyectadas tras la implementación de mejoras en el módulo</i>	<i>68</i>
	CONCLUSIÓN	70
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

Índice de figuras

Figura 1	Equipos de transmisión de consistencia BTG	9
Figura 2	Equipos para la medición de consistencia	11
Figura 3	Sistema de medición y calibración CPM.....	12
Figura 4	Diagrama de flujo de datos CPM	13
Figura 5	Raspberry Pi 4 Modelo B	14
Figura 6	Diagrama de flujo de datos Máquina/Módulo.....	25
Figura 7	Montaje de disipadores en la Raspberry Pi	30
Figura 8	Modificación de la carcasa para ventilación	30
Figura 9	Instalación del ventilador en la carcasa	31
Figura 10	Alojamiento de la Raspberry Pi dentro de la carcasa	31
Figura 11	Conexión del ventilador al GPIO de la Raspberry Pi.....	32
Figura 12	Proceso de ensamblaje de la carcasa protectora	33
Figura 13	Configuración del modem 4G Huawei.....	33
Figura 14	Integración de dispositivos externos a la Raspberry Pi	34
Figura 15	Procedimiento de cableado y montaje en la caja estanca	34
Figura 16	Procedimiento de cableado y montaje en la caja estanca	35
Figura 17	Pasos finales del montaje del módulo en el riel DIN	35
Figura 18	Montaje de tapa protectora	36
Figura 19	Descarga sistema operativo	37

Figura 20 Descarga sistema operativo	38
Figura 21 Descarga sistema operativo	38
Figura 22 Instalación sistema operativo en micro SD	39
Figura 23 Instalación sistema operativo en micro SD	40
Figura 24 Instalación sistema operativo en micro SD	41
Figura 25 Instalación sistema operativo en micro SD	41
Figura 26 Instalación sistema operativo en micro SD	42
Figura 27 Instalación sistema operativo en micro SD	42
Figura 28 Instalación sistema operativo en micro SD	43
Figura 29 Configuración inicial del sistema operativo	43
Figura 30 Configuración de parámetros regionales	44
Figura 31 Seguridad de la raspberry	44
Figura 32 Conexión a internet.....	45
Figura 33 Actualización del software	45
Figura 34 Finalización de la instalación inicial	46
Figura 35 Escritorio inicial de la raspberry.....	46
Figura 36 Actualización del sistema	47
Figura 37 Instalación de Box86	47
Figura 38 Instalación de wine	48
Figura 39 Instalación AnyDesk	49
Figura 40 Código para conexión remota.....	49
Figura 41 Software de calibración CPMWin.exe	50
Figura 42 Sistema TCR/CPM	56
Figura 43 Interfaz CPMWin.exe	57
Figura 44 Recepción de datos TCR/CPM a Raspberry	58
Figura 45 Conexión del módulo a la máquina	59
Figura 46 Comparación de resultados de consistencia Máquina/Módulo	61
Figura 47 Flujo de datos del módulo funcional	62
Figura 48 Comparación máquina/módulo de la calibración remota	63
Figura 49 Flujo de datos de la propuesta de monitoreo avanzado para mediciones de consistencia	67

Índice de tablas

Tabla 1 Adquisición de insumos para el desarrollo	33
Tabla 2 Consistencia de la celulosa durante el proceso y la relación con la raspberry	65

Siglas y simbología

- 4G: Estándar de cuarta generación para redes móviles.
- 5V: Referencia a un voltaje de 5 voltios.
- 3A: Referencia a una corriente de 3 amperios.
- ARM: Arquitectura de microprocesador.
- BTG: Empresa sueca desarrolladora de transmisores de consistencia.
- CLP: Pesos chilenos.
- CMPC: Empresas CMPC, compañía chilena de productos de madera, papel y celulosa.
- COM1: Es un puerto de comunicación en sistemas informáticos.
- CPU: Central Processing Unit o Unidad Central de Procesamiento.
- CPM: Plataforma modular de comunicación.
- CPMWIN.exe: Programa de calibración para transmisores de consistencia.
- DC: Direct Current o Corriente Directa.
- Ethernet: Estándar de redes de computadoras para LAN (Red de Área Local).
- GND: Ground o tierra en circuitos eléctricos.
- GPIO: General-Purpose Input/Output o Entrada/Salida de Propósito General.
- GUI: Graphical User Interface o Interfaz Gráfica de Usuario.
- HDMI: High-Definition Multimedia Interface o Interfaz Multimedia de Alta Definición.
- I.D: Identificación.
- IP55: Código de protección internacional que indica resistencia al polvo y agua.
- LED: Light Emitting Diode o Diodo Emisor de Luz.
- MEK-2500: Motor de transmisión de consistencia.
- PC: Personal Computer o Computadora Personal.
- POSIX: Interfaz de sistema operativo portátil para UNIX.
- Raspberry Pi: Una serie de computadoras de placa única de bajo costo.
- Riel DIN: Un tipo de riel metálico estándar utilizado en equipos eléctricos.

RS-485: Estándar de comunicaciones en serie para conexiones a larga distancia.

RS485: Otra notación para el estándar RS-485.

SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition o Control Supervisor y Adquisición de Datos.

SIM: Subscriber Identity Module o Módulo de Identidad de Abonado.

SO: Sistema Operativo.

TAI: Tecnología de Aplicación Industrial.

TCR: Sensor óptico para la medición de consistencia.

TIC: Tecnologías de la Información y Comunicación.

USB: Universal Serial Bus o Bus Universal en Serie.

Wi-Fi: Tecnología de red inalámbrica.

Introducción

La industria de la celulosa y el papel desempeña un rol fundamental en la economía global y es considerada un sector estratégico por su contribución al desarrollo sostenible y la generación de empleo. En Chile, esta industria tiene una importancia significativa, no solo por su impacto económico, sino también por su capacidad de integrar tecnología de punta en procesos productivos clave. Uno de los aspectos más críticos de esta industria es la medición precisa y la calibración de los transmisores de consistencia, dispositivos esenciales para garantizar la calidad del producto final y la eficiencia de los procesos productivos.

A pesar de los avances tecnológicos en el sector, la calibración de transmisores de consistencia sigue enfrentando importantes desafíos. La ubicación de estos equipos en áreas de difícil acceso, la necesidad de detener las operaciones para realizar ajustes y la escasez de especialistas capacitados incrementan los costos operativos y afectan la competitividad de las empresas. Estas dificultades resaltan la necesidad de soluciones innovadoras que modernicen los métodos de calibración, mejoren la precisión y reduzcan los costos asociados.

En este contexto, la presente investigación propone el diseño y desarrollo de un módulo de calibración remota basado en una Raspberry Pi. Este módulo busca superar las limitaciones de los métodos tradicionales al permitir la calibración y monitoreo en tiempo real desde ubicaciones remotas. La solución presentada no solo responde a las necesidades operativas del sector, sino que también contribuye a la sostenibilidad al disminuir la dependencia de desplazamientos presenciales y optimizar los recursos.

El desarrollo de este módulo se fundamenta en un análisis detallado de los requerimientos de la industria y en la integración de tecnologías accesibles, confiables y escalables. A lo largo del trabajo, se abordan aspectos técnicos clave, como la compatibilidad de software, la conectividad remota y la implementación en entornos industriales. Finalmente, el módulo es validado a través de pruebas realizadas en la planta CMPC Maule, demostrando su aplicabilidad y potencial para transformar procesos operativos en la industria de la celulosa.

Este trabajo no solo representa una contribución técnica significativa, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones y desarrollos en el ámbito de la digitalización y automatización industrial, ofreciendo una solución práctica y sostenible a uno de los mayores desafíos del sector.

Objetivo general

Desarrollar un módulo basado en Raspberry Pi para la calibración remota de transmisores BTG en entornos industriales.

Objetivos específicos

- Identificar las funcionalidades necesarias para implementar una calibración remota efectiva en equipos transmisores de consistencia BTG mediante el análisis de sus características técnicas y las necesidades del entorno industrial.
- Diseñar un módulo de calibración remota que integre hardware y software, optimizado para entornos industriales, con el fin de facilitar la calibración de equipos transmisores de consistencia BTG.
- Evaluar la efectividad del módulo de calibración remota en condiciones reales de operación industrial, verificando su precisión.

1. ANTECEDENTES GENERALES

1.1 Antecedentes de las empresas

La industria papelera en Chile se caracteriza por su innovación, su adaptación a las políticas ambientales y la competencia en el mercado mundial de la pulpa. En Chile la empresa CMPC se ha destacado en este ámbito. Parte de poder asegurar la calidad de la pulpa para los requerimientos internacionales se debe a los equipos de instrumentación de la empresa sueca BTG. Estas dos empresas las cuales han logrado mantenerse en el mercado con el paso del tiempo y adaptarse a las demandas del sector han podido consolidarse de forma clave en la producción de celulosa y derivados.

La empresa TAI Chile, la cual representa los intereses de BTG en Chile se ha dedicado a mantener estos equipos de calibración para poder asegurar la calidad de la pulpa. Teniendo presencia en todas las empresas que trabajan con los equipos de la marca sueca, siguiendo sus altos estándares de calidad en la mantención de estos equipos.

1.1.1 BTG

La empresa sueca de iniciales BTG, la cual fue fundada en el año 1921 se consolidó como una de las empresas primordiales para la creación de unas de las materias primas que se usan en la fabricación de un sin fin de productos cotidianos. Esta empresa se destaca por sus equipos de alta eficiencia en la medición de distintos parámetros de la celulosa (BTG, 2014)

Aunque la empresa recientemente fue comprada por una empresa alemana de mayor envergadura llamada VOITH, se mantiene el código ético que busca asegurar la calidad del producto que fabricará sus clientes a través de sus equipos de alta tecnología. (BTG, 2015)

Es por esto que la empresa sostiene estándares muy rigurosos en lo que respecta a la calidad, esto respaldado por certificaciones ISO como la 45001 y la ISO 9001. Las cuales respaldan la calidad y eficiencia en la producción operativa de la materia prima. Lo que permite proporcionar a sus clientes una garantía de la calidad de su producto de manufactura, (BTG, 2015).

1.1.2 CMPC

La empresa CMPC la cual fue fundada en Chile en el año 1920, y que actualmente tiene presencia en Argentina, Colombia, México, Uruguay y Brasil, la cual es una de las principales empresas a nivel mundial del sector forestal y papelerero tiene un enfoque en la calidad y adaptación a las necesidades del mercado.

Esta empresa tiene un fuerte compromiso con ser sustentables y refleja en sus prácticas una gran responsabilidad con el medioambiente. Estas iniciativas conservan los recursos naturales que se llegarán a utilizar para la manufactura de sus productos siendo consistentes con su enfoque medioambiental.

Una de las principales divisiones de la empresa CMPC es la división de Maule, ubicada en la séptima región del país y se centra únicamente en la producción de cartulina. Esta empresa de CMPC es reconocida por su alta calidad de sus productos que se distribuyen en mercados locales e internacionales. Por esto lograron consolidar de manera global sus productos por su alta calidad y sus altos estándares medioambientales en la producción de este producto, (CMPC, 2012).

1.1.2 TAI

La empresa con nombre Tecnología de Aplicación Industrial (TAI), con sede en Talca, la cual se ha posicionado como la única empresa que representa los intereses de la empresa BTG en Chile se destaca por ofrecer una mantención de alta calidad en los productos tecnológicos fabricados por BTG para la medición de los parámetros de la celulosa. (TAI Chile, 2014).

Fue fundada por un ingeniero industrial quien trabajo directamente en la fabricación de estos equipos en Suecia, aprendió de BTG la metodología para poder desarrollar un completo plan de mantención para el óptimo funcionamiento de sus equipos.

Ha ayudado a sus clientes en la mantención de los equipos BTG dentro del país, lo cual antes se debía realizar enviando estos grandes equipos de calibración al país de la empresa matriz para realizar dicha mantención. Este enfoque permite reducir el costo, el tiempo de espera para recibir el equipo con la mantención realizada desde el país sueco versus el tiempo de realizar la mantención en las mismas instalaciones de la planta de celulosa y calibrando estos equipos para una medición más certera a través de la realización de una mayor frecuencia de mantenimiento de dichos equipos, (TAI Chile, 2014).

Desempeñando un papel fundamental como la única empresa que representa los intereses de BTG en Chile, es la responsable de realizar el mantenimiento y calibración de estos transmisores de consistencia y otros productos de la empresa sueca. Además de

gestionar la venta de productos y repuestos para asegurar que los clientes locales reciban el nivel de calidad que representa a ambas empresas.

1.2 Problemática

La industria de la pulpa de celulosa, la manufactura de cartulina y papel entre otros necesita medir de manera consistente los parámetros de su materia prima de fabricación y exportación. Aunque trasladar la mantención de sus equipos a Chile redujo considerablemente el tiempo muerto que enfrentaban al enviar los equipos de BTG devuelta a la fábrica para realizar la mantención a través de la intervención de TAI Chile, sigue presentando un gran problema que radica en la compleja calibración de los dispositivos encargados de la medición de la consistencia de la celulosa.

Esta compleja calibración de los equipos genera distintos problemas. En primera instancia la ubicación estratégica de los sensores en las instalaciones de las plantas industriales los cuales se ubican por lo general en áreas de difícil acceso. Esto complica de gran manera la intervención por parte de los ingenieros especializados de la empresa TAI para realizar la calibración que asegura la calidad de la producción de la materia prima. Esto es un desafío físico complejo para los mantenedores que introduce el riesgo de daño accidental de las personas o estos costosos equipos. Es por esto que realizar una correcta calibración de estos dispositivos de la marca sueca requiere alto grado de especialización por parte de los ingenieros de TAI Chile. Esto implica un costo mayor para la empresa fabricante de la materia prima.

Además de necesitar especialistas que vayan in situ a llevar a cabo el proceso de calibración, lo cual representa riesgos, también tiene deficiencias como el que no existen tantos ingenieros capacitados para realizar estos procesos de calibración en el país lo que a consecuencia aumenta los tiempos de inactividad del proceso productivo ya que deben realizar mantenciones en distintas partes del país y en instancias no pueden realizar esta calibración de inmediato al solicitarlo la empresa mandante.

Es por esto que en un mercado tan competitivo como la industria de pulpa y papel, la cual prioriza la calidad de sus productos, la precisión de la medición realizados por los sensores es parte fundamental para asegurar la calidad de su materia prima. Es por eso que los sensores de la marca BTG deben operar siempre con la máxima precisión.

La recurrente necesidad del mercado en mantener estos sensores en correcto funcionamiento conlleva que exista una deficiencia operativa de las empresas productoras de celulosa para poder certificar la calidad de su producto. Esto se debe a la indiscutible dependencia de estas grandes empresas industriales a una pequeña empresa representada por un pequeño grupo de expertos chilenos. Esto implica que una falla o desajuste en la calibración genere una interrupción en el monitoreo de la calidad optima de los parámetros

de la materia prima, lo que evidencia la urgencia de implementar una respuesta más ágil a la des calibración de los sensores.

1.3 Calibración de equipos de instrumentación de forma remota

El mantenimiento o calibración de forma remota surge a través del cruce de la avanzada tecnología de la información y la industria contemporánea esto constituye una significativa transformación en la calibración de los equipos en la industria de la pulpa. Esta metodología de calibración remota se fundamenta en la tecnología de la información la cual permite facilitar la supervisión y calibración de los sensores a distancia desde cualquier locación del mundo.

Esto disminuye la necesidad de contar con los reducidos expertos en el lugar físico que se encuentra el sensor según lo que expone Madrigal, Guzmán y otros autores (2020) quienes determinan que esta modalidad se transformó en un instrumento indispensable en los ámbitos industriales donde la exactitud y calidad de sus procesos deben seguir una serie de normativas de calidad.

En la industria papelera, donde las grandes máquinas manufactureras las cuales deben funcionar en rigurosas condiciones, la metodología de realizar un mantenimiento remoto se destaca como una revolución industrial que permite disminuir costes y periodos de inactividad de la cadena productiva.

Adicionalmente, otras herramientas tecnológicas, tales como videoconferencias y sistemas de diagnóstico en línea, facilitan la colaboración en tiempo real y a distancia entre los expertos y la empresa que solicita el servicio, lo cual incrementa de manera significativa la eficiencia operativa.

Realizar una correcta calibración de forma remota presenta cierta complejidad debido a que en ocasiones se puede interrumpir la conexión del módulo con los sensores, o presentar dificultades técnicas que solo pueden ser solucionadas de forma presencial por expertos. Esto puede presentar un desafío para esta metodología industrial.

Las principales ventajas que propone la calibración remota en comparación con la calibración presencial son:

- Disminución de gastos: Eliminación de gastos vinculados a los traslados y la logística de transporte.
- Optimización del tiempo: Procedimientos más eficientes debido a las intervenciones a distancia.
- Disponibilidad elevada: Reacción inmediata con el fin de optimizar el desempeño de los equipos.

- Eficacia operativa: Oportunidad de llevar a cabo intervenciones desde cualquier lugar conectado.
- Optimización de la eficiencia: Diagnósticos e intervenciones precisas a través de acceso a distancia.

1.4 Visión general sobre los equipos de instrumentación BTG

En el campo de la medición de consistencia, se destacan una serie de dispositivos de última generación concebidos para proporcionar una precisión insuperable, una característica esencial para asegurar altos estándares de calidad en los productos finales. La consistencia, que desempeña un papel fundamental en numerosos procesos industriales, desempeña un papel fundamental en la optimización de recursos, la disminución de desperdicios y la obtención de resultados consistentes y confiables.

Estos equipos son el resultado de notables progresos tecnológicos y hay diferentes tipos de equipos los que cumplen requerimientos específicos según el tipo de aplicación requeridas en distintos contextos industriales. Como por ejemplo las mediciones de alta precisión necesarias en la industria papelera y de la pulpa.

Esta información incluyendo las características técnicas que se presentan a continuación son fundamentadas en las características técnicas que entrega BTG (BTG 2014).



Fuente: <https://4.imimg.com/data4/SR/TP/MY-2964462/consistency-transmitter-500x500.jpg>

Figura 1 Equipos de transmisión de consistencia BTG

1.4.1 Equipos transmisores de consistencia BTG

Serie TCR:

- **TCR PeakTotal:** Un transmisor de consistencia total con un rango de medición del 0.5 al 16%, basado en el método Peak patentado por BTG para el análisis óptico.
- **TCT-2300:** Un transmisor de consistencia que opera con un voltaje de 90-250 VAC y una frecuencia de 50-60 Hz.
- **TCR-2500, TCR-2501 y TCR-2511:** Transmisores ópticos de consistencia total con un rango de medición del 0.5 al 16%, independientes del grado y especie de madera.
- **TCT-2301:** Emplea el método peak para medir la consistencia total de las suspensiones de pulpa, diferenciando entre partículas grandes y pequeñas.

Serie MEK:

- **MEK-3000 TwinTorque:** Sensor rotativo que integra la tecnología TwinTorque para una medición más precisa y confiable.
- **MEK-2500 RotoForce:** Asociado con aplicaciones de revestimiento y prensa de tamaño.
- **MEK-2300:** Con una tarjeta de sensor montada en superficie menos sensible a la vibración del tubo, y una tasa de muestreo 10 veces más rápida y resolución cuatro veces mayor para una mayor sensibilidad de medición.

Serie ACT y MBT:

- **ACT-2500 AmpliForce:** También asociado con aplicaciones de revestimiento y prensa de tamaño.
- **MBT-2000:** transmisor de consistencia

BTG ofrece una variedad de dispositivos para medir la consistencia, incluyendo opciones para medición rotativa de consistencia de fibra, medición de consistencia de fibra con cuchilla activa, medición de consistencia total en todo el rango, medición de baja consistencia total y medición de consistencia de fibra con cuchilla estática.



Fuente: <https://papermart.in/wp-content/uploads/2021/06/25-2.jpg>

Figura 2 Equipos para la medición de consistencia

Los transmisores de consistencia de BTG se instalan en línea, inmediatamente aguas abajo de la bomba, en zonas de flujo turbulento de las conducciones de transporte de pulpa. Estos instrumentos proporcionan lecturas en tiempo real, asegurando una monitorización continua y precisa de la consistencia de la celulosa durante su tránsito por las tuberías. Esta disposición técnica facilita una supervisión de calidad inmediata y eficiente en las operaciones de producción de pulpa y papel.

1.5 Plataforma modular de calibración (CPM)

La Medición de Perfil de Consistencia (CPM) se erige como una solución avanzada de monitorización orientada a supervisar y regular la consistencia de materiales en aplicaciones industriales, con un particular enfoque en la industria de pulpa y papel. Según (TLM, 2018), es imprescindible reconocer que la esencia del CPM se magnifica mediante la sinergia con los equipos de medición: la visualización y análisis de los datos que estos equipos proporcionan son cruciales para desencadenar la plena capacidad del CPM.



Fuente: <https://i.ebayimg.com/images/g/PQwAAOSwXTFjPFN4/s-11200.webp>

Figura 3 Sistema de medición y calibración CPM

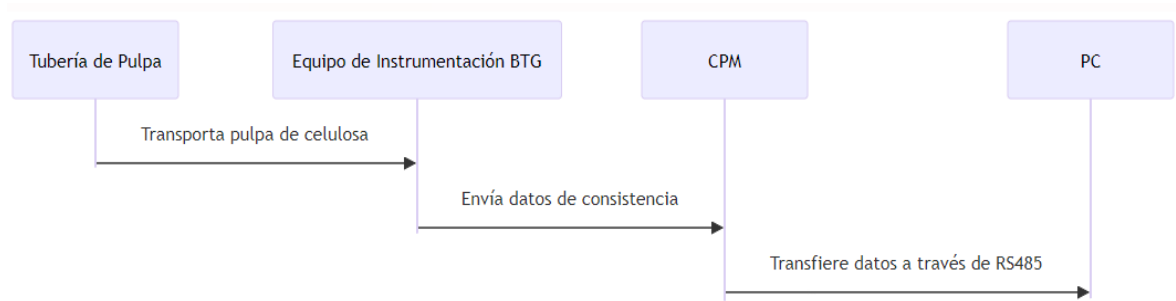
1.5.1 Datos de la transmisión de CPM

- La CPM de BTG permite realizar una calibración al equipo transmisor de consistencia lo que se traduce en parámetros en tiempo real los cuales son precisos y reflejan la condición de la materia prima en distintas partes del proceso productivo.
- Posee una interfaz gráfica para el usuario, la cual permite tener el control en la medición correcta de los parámetros, es decir son la parte visual que permite a los expertos visualizar en tiempo real las mediciones obtenidas.
- Representación visual y dinámica la cual muestra a los operadores la consistencia variable de la celulosa y permite ajustar químicamente la materia prima para ajustar en tiempo real la consistencia de la mezcla.
- Un sistema de alertas permite a los dispositivos de medición generar alertas ante cualquier desviación de la materia prima y responder adecuadamente a esta anomalía.
- La historización de los análisis permite registrar las variables de los parámetros testeados para llevar un historial detallado.

El módulo CPM utiliza un protocolo llamado RS-485 la cual es una manera eficiente de transmitir datos a largas distancias a través de un cable especial, el cual además soporta interferencias electromagnéticas. Al conectar este protocolo de

transmisión de datos entre la CPM y una computadora permite visualizar una interfaz y ver en tiempo real las mediciones que realizan los sensores.

Esta conexión permite realizar a distancia el monitoreo de los sensores e incluso configurar la calibración de estos pero la falta de un dispositivo que lo permita frena estas funciones a distancia.



Fuente: Diagrama de elaboración propia

Figura 4 Diagrama de flujo de datos CPM

1.6 Raspberry Pi

La Raspberry Pi es una computadora de una única placa que en principio tuvo un uso de herramienta educativa pero su propósito se desvió al convertirse en una poderosa solución para diferentes áreas una muy relevante es el área industrial. Esta computadora que posee una placa integrada ofrece una gran capacidad de procesamiento y gran conectividad en un pequeño y compacto formato.

Esta CPU que combina flexibilidad y eficiencia energética, la cual además posee una arquitectura de código libre permitieron que se integrara a un escenario industrial. Permitiendo el monitor y análisis de datos en tiempo real. Además, una gran comunidad de desarrolladores que ofrecen de manera gratuita un sin fin de software la convirtió en una herramienta poderosa para ingenieros y técnicos que buscan crear soluciones tecnológicas para la industria.



Fuente: <https://raspberrypi.cl/producto/raspberry-pi-4-modelo-b-8gb-ram/>

Figura 5 Raspberry Pi 4 Modelo B

1.6.1 Raspberry en la digitalización industrial

La industria de la celulosa busca soluciones para procesos de producción y esto ha aumentado con los años con el propósito de optimizar y aumentar la eficiencia industrial es por esto que la Raspberry Pi se establece como una herramienta tecnológica que debido a su diseño compacto y altas capacidades de hardware se ha convertido en una opción robusta para la industria 4.0.

El tamaño de esta microcomputadora es reducido y esto le permite ser una opción viable a sistemas computacionales más tradicionales Debido a su arquitectura de la cual tiene USB, HDMI y Ethernet permite que se adapte a entornos industriales complejos. Estas características permiten la integración con un sin fin de dispositivos como los sensores de BTG o sistemas de control avanzados.

Cómo (Velásquez, 2013) mencionó, la Raspberry Pi puede interactuar con diferentes dispositivos y esto es crucial en ámbitos industriales modernos permitiendo la recopilación de datos en tiempo real y un acceso remoto seguro y preciso para el monitoreo de equipos industriales.

El software de esta microcomputadora usa distribuciones que se basan en Linux, su sistema operativo llamado Raspbian facilita que una microcomputadora pueda operar de manera fluida lo cual es necesario en las aplicaciones industriales.

En conclusión, esta herramienta tiene una gran capacidad de adaptación en entornos industriales y presenta un papel importante en las industrias para transicional a la industria 4.0.

1.6.2 Implementación industrial de la raspberry

La Raspberry evoluciono de ser una simple microcomputadora con fines educativos a transformarse en un componente para la infraestructura de sistemas industriales más tecnológicos y además le permite adaptarse a un entorno variante de forma eficaz.

Integración con Sistemas SCADA: La Raspberry se integra con los sistemas SCADA y es de vital importancia para la gestión centralizada de entornos industriales. Como (Collahuazo, 2017), destacó, la capacidad de Raspberry Pi para integrarse con estos sistemas no solo mejora la eficiencia de la gestión, sino que también facilita una supervisión más detallada y controlada de las operaciones.

Desarrollo de prototipos: La poca complejidad de la raspberry permite que sea una plataforma ideal para realizar prototipos a bajo costo y permite que las empresas desarrollen soluciones de manera veloz previo a una implementación de mayor envergadura.

Seguridad: La raspberry se integra con sistemas de prevención de hackeos, o sistemas de vigilancia entre otros sensores que permiten garantizar la seguridad de los datos que se procesan a través de esta. Esto permite que el diseño modular se adapte a desafíos específicos que conlleva la implementación de una industria digitalizada.

Monitoreo Avanzado: La Raspberry se integra con gran cantidad de sensores disponibles en el mercado y esta es una solución ideal para poder monitorizar en tiempo real una serie de parámetros que son críticos para prevenir fallos y mantener la eficacia de la producción industrial.

Optimización de Procesos: Esta moderna herramienta permite que se optimicen procesos a través de software que permite mejorar procesos industriales de forma eficiente y cumpliendo estándares de calidad requeridos por las grandes empresas.

Automatización Inteligente: La microcomputadora permite que los equipos de instrumentación se automaticen controlando distintos tipos de tareas lo que reduce la posibilidad de errores humanos y garantiza que el proceso se realice de manera uniforme.

1.7 Modem 4G para conectividad industrial

En los entornos industriales donde generalmente se encuentran alejados de las ciudades se presenta un desafío en la conectividad a internet, el cual es necesario para que el módulo sea funcional. Esto implica que si no se garantiza una conexión de internet confiable no se podría operar el dispositivo para la calibración remota de manera continua en el tiempo.

Una solución de fácil acceso se presenta en un formato pequeño como lo es un modem de internet, estos dispositivos son ideales en un entorno industrial donde usar una red móvil es una forma fácil de proporcionar acceso a internet, esto tiene un impacto positivo ya que cablear con red ethernet a lugares de difícil acceso resulta una opción poco viable.

El cableado para conexión de ethernet, aunque es mucho más fiable presenta una gran complicación para las empresas porque incrementa los costos y dificulta que la empresa acepte la implementación de estos dispositivos ya que requiere la construcción de infraestructura para cada módulo que se pretenda instalar.

Este tipo de modem presenta la característica de permitir redes 4G y además tiene la capacidad de conectarse de manera instantánea a internet sin la necesidad de que se configure a través del módulo, esto es una solución sencilla pero efectiva para obtener una conexión fiable que permite la monitorización y calibración continua de los sensores a través de la Raspberry.

1.8 Software requerido

En el ámbito de la informática y las tecnologías de software, es esencial contar con herramientas que faciliten la interoperabilidad entre sistemas, la gestión remota y la precisión en la recopilación y análisis de datos. Wine, Box86, AnyDesk y CPMWIN.exe representan un conjunto de aplicaciones que, cada una en su especialidad, proporcionan soluciones innovadoras para estos desafíos. Desde permitir la ejecución de aplicaciones de Windows en sistemas Unix, hasta facilitar el acceso remoto y la gestión precisa de datos en sistemas industriales, estas herramientas son pilares en el ecosistema tecnológico actual. En las siguientes secciones, se describirán con detalle la funcionalidad y características principales de cada una de estas soluciones clave.

1.8.1 Wine

Wine, es un software libre y de código abierto que permite a los usuarios de sistemas operativos basados en Unix, como Linux, ejecutar aplicaciones diseñadas para Microsoft Windows. En lugar de emular internamente la lógica de Windows, Wine traduce las llamadas de la API de Windows al instante en llamadas POSIX, eliminando las penalizaciones de rendimiento y memoria de otros métodos y permitiendo una integración limpia de las aplicaciones de Windows en el entorno de escritorio.

1.8.2 Box86

Box86 es una herramienta que permite la ejecución de aplicaciones x86 (específicamente aquellas diseñadas para Linux) en sistemas con arquitecturas diferentes, como ARM, que es común en dispositivos como la Raspberry Pi. Box86 utiliza la técnica de emulación dinámica para lograr su objetivo, traduciendo las llamadas de las aplicaciones en tiempo real para que puedan ser comprendidas y ejecutadas por el sistema host. Esto resulta esencial para aquellos que desean ejecutar aplicaciones específicas que no tienen versiones nativas para plataformas ARM u otras.

1.8.3 AnyDesk

AnyDesk es una solución de software de escritorio remoto que permite a los usuarios acceder y controlar dispositivos desde cualquier ubicación. Con su protocolo único de transferencia de datos, DeskRT, AnyDesk ofrece una experiencia fluida y receptiva, incluso en conexiones con ancho de banda limitado. Es ampliamente utilizado por profesionales de TI y empresas para brindar soporte técnico, administrar servidores o acceder a estaciones de trabajo de manera remota. Su diseño ligero y optimizado garantiza un rendimiento eficiente y un acceso seguro.

1.8.4 CPMwin.exe

Este software se desarrolló con el fin de poder calibrar, y visualizar las mediciones de consistencia de los sensores BTG, esto facilita que se gestionen los datos y se realice la calibración a través de un computador. Esta interfaz le permite al usuario que interactúe con los sensores de medición y a través del software configurar los parámetros para calibrar la medición en tiempo real de la consistencia de la celulosa, además de poder exportar la historización de datos para un posterior análisis.

Este programa desarrollado por BTG facilita que los profesionales configuren y monitoricen la calibración y los parámetros que entregan los sensores. Aunque no fue creado para calibrar a distancia o visualizar de forma remota, con la ayuda de la Raspberry se puede convertir en una herramienta con una función más avanzada de la que se esperaba al ser creada.

2. DISEÑO Y DESARROLLO DEL MÓDULO

2.1 Conceptualización del diseño

La industria de la celulosa enfrenta desafíos que necesita de soluciones modernas. Uno de los desafíos principales es la adaptación a las nuevas tecnologías y la calibración a distancia pretende garantizar una medición fidedigna de los parámetros productivos. Esto debido a una mayor frecuencia de las calibraciones y menor tiempo de inactividad por mantención de los sensores.

En este contexto específico los sensores de consistencia de la marca BTG han desempeñado un papel de vital importancia en las empresas productoras de esta materia prima. Estos equipos funcionan en un rango de operaciones específicos lo que permite a los profesionales obtener información de la calidad de la celulosa a través de comprobar que los parámetros sean correctos para las necesidades de esa producción. La mantención física requiere obligatoriamente una presencia de las profesionales in situ, pero esta se realiza con mucha menor frecuencia que la calibración. Lo que reduce los recursos necesarios para completar esta tarea.

La solución que se propone en este trabajo es la de un módulo en base a la microcomputadora Raspberry Pi para realizar una calibración de los sensores de forma remota. Y aunque la conexión 4G puede presentar algunas caídas la robustez de este sistema permite restablecer de forma inmediata estas fallas de manera autónoma.

Aunque el sistema operativo de la Raspberry pueda enfrentar ciertos problemas de compatibilidad, el software de Wine permite que se vuelva una plataforma confiable, esto sumado a que el diseño del módulo protege a través de la caja estanca con protección IP55 permite que los distintos factores de riesgos que podrían hacer que el módulo de calibración remota fallé se disminuyan al mínimo.

Siguiendo el diseño que busca crear una solución innovadora a un problema presente en la industria de la celulosa se logra crear una valiosa tecnología para las empresas, permitiendo un realizar un proceso que no se había podido lograr en el pasado. Esto permitirá a la industria asegurar de mejor forma la calidad de su producto al mejorar la eficiencia de la calibración.

2.2 Aspectos funcionales del módulo

En la industria de la celulosa se requieren soluciones a la medida de la tecnología que se presenta en la actualidad. Este proceso se logra convertir en un pilar del proceso productivo y la monitorización de los parámetros de la pulpa para asegurar una consistencia adecuada la cual es un factor primordial para obtener un producto de calidad

que cumplan los estándares industriales. Los sensores de la marca BTG cumplen un rol primordial en la producción de celulosa.

El método actual que requiere la calibración in situ presenta ciertas limitaciones como la necesidad de especialistas en lugares de compleja accesibilidad, traslados del personal desde la empresa TAI Chile a distintos lugares del país donde se requieran las correctas mantenciones de los sensores BTG.

Es por esto que se busca diseñar un módulo que integre una Raspberry Pi a la CPM para brindar una conexión de forma remota como si un especialista estuviera en el lugar del sensor las 24 horas del día. Esto no solo permite la calibración a distancia si no que permite una solución sencilla pero eficaz a la poca disponibilidad de especialistas capacitados para la mantención de estos complejos equipos de origen sueco.

Debido a que la Raspberry es un componente electrónico que en un entorno industrial es muy frágil y presentaría una serie de problemas por las condiciones del entorno en el que se busca instalar se necesita que el diseño proteja el hardware. Para esto es necesario determinar una forma segura de garantizar que las condiciones que pueden estar presentes en la industria como el polvo y el agua no dañen este dispositivo. Es debido a esta necesidad que una caja estanca con protección IP55 entra en juego. Esto permite el uso industrial en las posibles condiciones que podrían dañar el módulo.

De manera adicional es importante que esta solución pueda adaptarse a la creciente escalabilidad que se genera a través de la rápida evolución tecnológica. Es debido a esto que el módulo permite sentar la base para futuras integraciones que permitan mejoras en el proceso que realizan los equipos BTG y se alineen con la rápida y creciente industria 4.0.

2.3 Componentes para la construcción del módulo

La construcción de módulos en el ámbito industrial requiere de componentes precisos y de alta calidad. En el diseño del módulo en cuestión, se han seleccionado siete componentes esenciales:

2.3.1 Raspberry Pi 4 Modelo B

Lanzado en 2020 por la Fundación Raspberry, este microordenador ha revolucionado la industria gracias a su asequibilidad y versatilidad. Ofrece conectividad avanzada, con soporte específico para Bluetooth 5.0 y Wi-Fi 802.11ac, optimizando la transmisión de datos para monitoreo y calibración remota.

2.3.2 Caja de Estanca Sobrepuesta IP 55 con Placa de Montaje

Este componente garantiza la protección y distribución eléctrica. Es esencial que se considere una versión con mayor resistencia al agua si el módulo opera en entornos con alta humedad.

2.3.3 Carcasas para Raspberry Pi 4

Estas carcasas, diseñadas específicamente para la Raspberry Pi 4, protegen el dispositivo y, según el modelo, ofrecen ventilación adecuada para prevenir el sobrecalentamiento. La Carcasa Riel DIN es particularmente útil para montar la Raspberry en cajas estándar, protegiéndola de interferencias electromagnéticas.

2.3.4 Modem Huawei USB 4G Plug and Play

Asegurando conectividad móvil, este modem es esencial. Es vital verificar su compatibilidad y eficiencia con la Raspberry Pi 4 para garantizar una transmisión de datos óptima.

2.3.5 Tarjeta SIM 4G

Este componente es crucial para acceder a redes móviles y garantizar la conectividad del módulo.

2.3.6 Riel DIN

Un estándar que facilita el montaje de dispositivos en paneles y gabinetes eléctricos, garantizando una organización y seguridad óptimas.

2.3.7 Otros Componentes

Los soquetes, cables y enchufes son fundamentales para la conexión eléctrica y la alimentación del dispositivo. Es crucial especificar sus capacidades y funcionalidades para garantizar un rendimiento óptimo.

En resumen, la construcción de un módulo industrial eficiente y duradero se basa en la selección cuidadosa de componentes de calidad. Con los componentes mencionados

y una implementación adecuada, se promete un módulo que superará las expectativas en términos de rendimiento y durabilidad.

2.4 Dimensionado del módulo

El módulo diseñado para la calibración remota de transmisores de consistencia ha sido meticulosamente concebido teniendo en cuenta las exigencias de la industria. Su estructura física, que refleja dimensiones precisas y compactas, es el resultado de combinar tecnologías modernas con una ingeniería adaptada específicamente para resistir y funcionar en entornos industriales rigurosos.

2.4.1 Módulo Completo

Se proyecta una unidad compacta que engloba todos los componentes vitales. Se busca un diseño que optimice el espacio sin sacrificar funcionalidad. Cada unidad estará equipada con un indicador LED que muestra el estado operativo.

- Alto: 120 mm
- Ancho: 80 mm
- Profundidad: 50 mm
- Peso estimado: 350 g

2.4.2 Raspberry Pi 4

El corazón de procesamiento del módulo, la Raspberry Pi 4 se destaca por su tamaño compacto y potentes especificaciones.

- Alto: 56.5 mm
- Ancho: 85.6 mm
- Profundidad: 17 mm
- Peso: 45 g
- Almacenamiento: MicroSD, capacidad según necesidades específicas.

2.4.3 Carcasa con Riel DIN

Esta carcasa robusta protege la Raspberry Pi y garantiza una ventilación adecuada, crucial para el rendimiento y durabilidad del dispositivo.

- Alto: 90 mm
- Ancho: 75 mm
- Profundidad: 30 mm
- Peso estimado: 120 g
- Ventilación: Ranuras superiores e inferiores, con orificios adicionales para un ventilador específico.

2.5 Integración módulo/máquina

Dentro del marco técnico de este diseño, se contempla un equipo altamente especializado cuyo objetivo primordial es la calibración remota de instrumentos de consistencia BTG y la monitorización en tiempo real de datos referentes a la consistencia de la celulosa. La data generada es esencial para garantizar estándares óptimos de calidad y eficiencia en el proceso productivo, y se obtiene en tiempo real, ofreciendo una representación fiel de las condiciones actuales de la materia prima en flujo por las tuberías de pulpa.

La transmisión de estos datos se conceptualiza para ser enviada directamente a la Raspberry Pi, donde se visualizarán mediante una aplicación específicamente diseñada por BTG. Esta aplicación, en su diseño, no solo mostrará la información, sino que estará dotada de herramientas innovadoras que facilitarán la interpretación, análisis y calibración en tiempo real.

Para la funcionalidad de calibración remota, se prevé el uso de AnyDesk, una solución de software que facilita la visualización y control a distancia. Mediante AnyDesk, se anticipa que la Raspberry Pi proyectará su interfaz, que mostrará la aplicación de BTG y los datos en tiempo real, hacia un almacenamiento en la nube. Esta transmisión reflejará fielmente la actividad en tiempo real que ocurre en la Raspberry Pi.

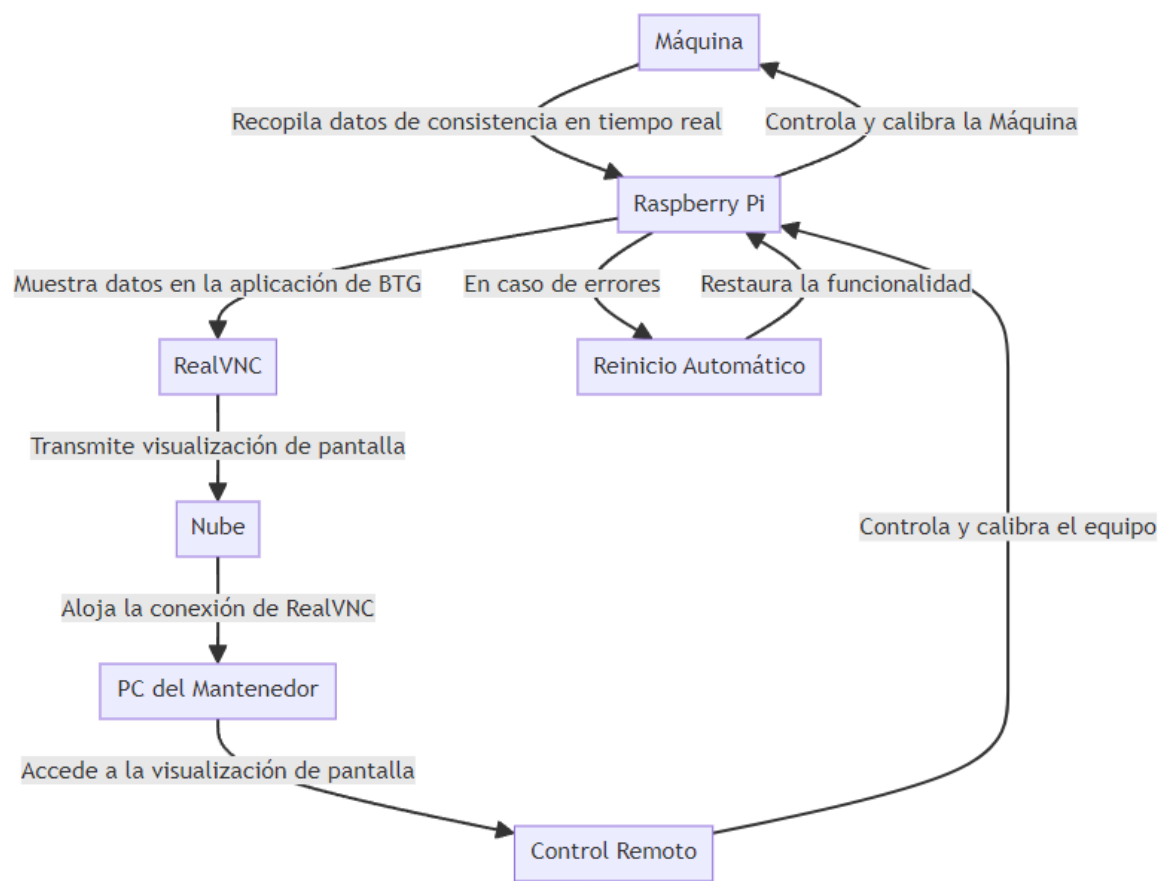
Desde una localización distante, el mantenedor podrá acceder y tomar control de esta visualización remota desde su PC. Esto se logrará gracias a una aplicación de escritorio remoto, que se conectará a la transmisión en la nube de AnyDesk. A través de esta conexión, el mantenedor no solo podrá visualizar los datos en tiempo real, sino que también tendrá la capacidad de control sobre la Raspberry Pi y la aplicación BTG, facilitando ajustes y calibraciones precisas desde cualquier lugar.

Se presta especial atención a la seguridad en este diseño conceptual, garantizando la protección de datos mediante contraseñas sólidas y autenticaciones en todos los dispositivos y aplicaciones involucradas. Si bien la transmisión de datos se concibe

principalmente de forma unidireccional, se prevé una interacción bidireccional cuando el mantenedor interactúe con la Raspberry Pi.

En caso de que ocurran interrupciones o fallos en la transmisión, el módulo se diseña con una robustez característica. Se contempla una función de reinicio automático, que garantizará una operación ininterrumpida y la continuidad en la transmisión de datos.

El diseño global de este sistema se centra en la eficiencia, accesibilidad y flexibilidad, permitiendo que los mantenedores tengan un control preciso sobre las operaciones, sin las limitaciones de barreras físicas o geográficas.



Fuente: Diagrama de elaboración propia

Figura 6 Diagrama de flujo de datos Máquina/Módulo

2.6 Puntos clave del módulo de calibración remota

El diseño del sistema propuesto se visualiza a través de interacciones coordinadas entre varios componentes esenciales:

2.6.1 Equipos de instrumentación BTG

Este equipo, situado en las tuberías de celulosa, monitorea el proceso productivo y entregará valores correspondientes a la consistencia de la celulosa de manera constante,

generando datos cruciales en tiempo real que influyen en la calidad y eficiencia del proceso.

2.6.2 Raspberry Pi

Se espera que reciba y muestre los datos en tiempo real a través de una aplicación BTG, que además brindará herramientas esenciales para su interpretación y acciones adecuadas

2.6.3 AnyDesk

La inclusión de AnyDesk en el diseño del software permitirá que la Raspberry Pi transmita su pantalla y los datos esenciales en tiempo real a la nube, que actuará como un enlace, posibilitando que el mantenedor pueda acceder a la visualización remota en cualquier momento.

2.6.4 PC del mantenedor

Se anticipa que, mediante una aplicación de escritorio remoto, el mantenedor no solo tendrá la capacidad de visualizar los datos, sino que también tendrá un control total sobre la Raspberry Pi y la aplicación BTG, permitiéndole tomar decisiones informadas y realizar ajustes y calibraciones precisas.

2.6.5 Reinicio automático

Se considera la resistencia del sistema en su capacidad de recuperación. Ante cualquier interrupción, se prevé un reinicio automático, asegurando una conexión constante y garantizando que la transmisión de datos y el control remoto se mantengan sin interrupciones.

2.7 Integración del módulo con el sensor de consistencia

La integración del módulo propuesto con los equipos desarrollados por BTG, se ha diseñado para ser robusta y eficiente, garantizando una interoperabilidad sin fisuras. A continuación, se detallan las especificaciones técnicas y consideraciones clave para esta integración

2.7.1 Conexión física

- **Interfaz RS-485:** La máquina preexistente se comunica mediante el protocolo RS-485, un estándar industrial para la transmisión de datos en aplicaciones de control y monitoreo. El módulo ha sido equipado con puertos compatibles con RS-485, garantizando una transmisión de datos bidireccional confiable.
- **Cableado RS-485:** La conexión física entre la máquina y el módulo se establece utilizando un cable RS-485, diseñado específicamente para soportar las características eléctricas y de transmisión del protocolo.

2.7.2 Conectividad a internet

- **Modem 4G:** El módulo utiliza un modem 4G para establecer una conexión a Internet. Esta elección proporciona una conectividad inalámbrica de alta velocidad, permitiendo una transmisión de datos en tiempo real y una respuesta rápida a las instrucciones remotas.
- **Topología de Red:** El modem 4G actúa como un punto de acceso, creando una infraestructura de red local que facilita la comunicación entre el módulo y la nube.

2.7.3 Compatibilidad de software y emulación

- **Software BTG cpmwin.exe:** Esta aplicación específica, diseñada para sistemas operativos Windows, es esencial para el funcionamiento del módulo.
- **Emulación con Wine:** Dado que la Raspberry Pi opera bajo un sistema operativo basado en Linux, se utiliza el software "Wine" para emular el entorno Windows. Esto permite que el software BTG cpmwin.exe se ejecute en Raspberry Pi como si estuviera en un entorno nativo de Windows.

2.7.4 Especificaciones de alimentación eléctrica

- **Voltaje y Corriente:** Mientras que la máquina principal opera con un voltaje industrial de 380V, el módulo ha sido diseñado para funcionar con corriente doméstica estándar de 220-240V. La Raspberry Pi, componente central del módulo, se alimenta mediante un adaptador tipo C de 5V y 3A, garantizando un suministro de energía estable y seguro.

2.7.5 Procedimiento de configuración y calibración

- **Operación Autónoma:** Tras su instalación y conexión inicial, el módulo opera de manera autónoma, requiriendo mínima intervención manual.
- **Calibración Especializada:** A pesar de su operación autónoma, la calibración inicial y los ajustes subsiguientes son críticos y deben ser realizados por un especialista técnico. Esta calibración se lleva a cabo de forma remota, utilizando una laptop que se conecta directamente a la Raspberry Pi.

2.8 Adquisición de insumos

Para el diseño y desarrollo del módulo de calibración remota para transmisores de consistencia BTG, se seleccionaron componentes y accesorios de alta calidad y especificaciones técnicas adecuadas. A continuación, se detallan los insumos adquiridos:

Nº	Producto	Costo	Descripción
1	Raspberry Pi 4 Modelo B 8GB RAM	\$89.990	Microcontrolador de alto rendimiento con capacidad multitarea, utilizado como unidad central de procesamiento.
2	Memoria MicroSD 64GB Sandisk	\$14.990	Esencial para el almacenamiento del sistema operativo y software específico.
3	Transformador US8 tipo C 5v 3A	\$7.990	Proporciona alimentación eléctrica DC requerida para la Raspberry Pi.
4	Carcasa raspberry pi 4b para riel din con ventilador	\$19.675	Protege el microcontrolador y garantiza una disipación térmica eficiente.
5	Pack Disipadores para Raspberry Pi 4	\$2.990	Mejora la disipación térmica del microcontrolador, optimizando su rendimiento.
6	Cable Micro HDMI a HDMI para Raspberry Pi 4B de 2 m	\$6.990	Facilita la interfaz visual para configuraciones y diagnósticos.
7	Despacho a domicilio	\$7.990	Despacho de los componentes
8	Huawei E8372h-608 Módem 4G LTE	\$104.50 USD	Proporciona conectividad 4G para transmisión de datos.

9	DSD TECH SH-U14 USB a RS485 Cable FTDI	\$28.95 USD	Facilita la comunicación entre dispositivos con interfaz RS485.
10	Teclado Inalámbrico Mouse Touchpad Rf 2.4	\$54.380	Utilizado para operaciones iniciales y configuraciones.
11	Caja estanca 170x220x85mm IP55 Rectangular	\$33.860	Proporciona protección física al módulo contra agentes externos.

Tabla 1 Adquisición de insumos para el desarrollo

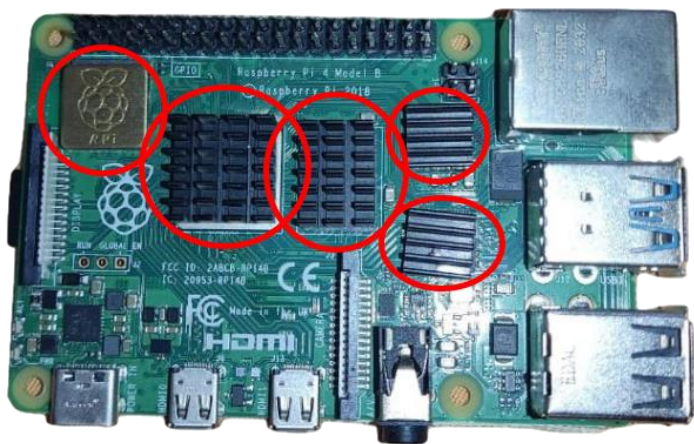
El costo total de los insumos y componentes, incluyendo gastos de envío, fue de un total de \$238,855 CLP.

2.9 Proceso de construcción del módulo

La implementación física del módulo de mantenimiento remoto para transmisores de consistencia BTG implica una serie de operaciones detalladas y precisas, enfocadas en garantizar una operatividad eficiente y una durabilidad robusta en entornos industriales.

2.9.1 Montaje de Disipadores en la Raspberry Pi

Con el objetivo de estabilizar la operación térmica de la placa y evitar flujos de calor no deseados que puedan comprometer la integridad y operatividad del microcontrolador, se utilizaron disipadores diseñados específicamente para ciertos puntos críticos de la Raspberry Pi. Estos disipadores se montaron en zonas estratégicas de la placa, asegurando una transferencia térmica eficiente y adecuada, evitando así posibles sobrecalentamientos que pudieran afectar el rendimiento del dispositivo.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 7 Montaje de disipadores en la Raspberry Pi

2.9.2 Modificación de la carcasa

Para adaptar la carcasa al sistema de ventilación y garantizar un flujo de aire óptimo, se realizaron modificaciones precisas en la misma. Utilizando herramientas de precisión, se efectuó una perforación en la carcasa del riel din. Esta perforación fue adaptada al tamaño y perfil del ventilador, permitiendo su posterior montaje y asegurando una ventilación adecuada para el conjunto del módulo.



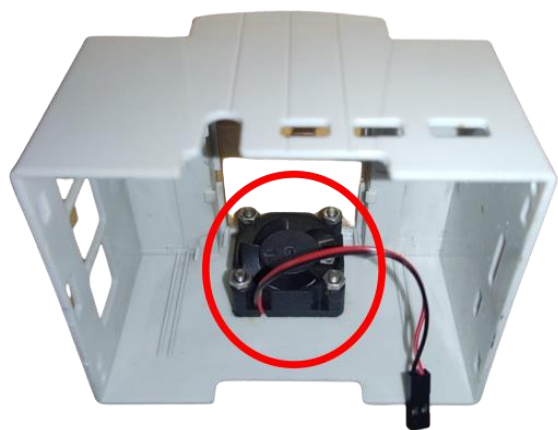
Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 8 Modificación de la carcasa para ventilación

2.9.3 Montaje del ventilador

La importancia de mantener una temperatura controlada en dispositivos electrónicos es crucial para su buen funcionamiento. Por ello, con el objetivo de asegurar un flujo de aire controlado y constante que favorezca la disipación de calor, se procedió al montaje del ventilador. Este fue fijado en la perforación previamente realizada en la

carcasa, garantizando su correcta orientación para optimizar la circulación de aire y, por ende, la refrigeración del sistema.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 9 Instalación del ventilador en la carcasa

2.9.4 Montaje de la Raspberry Pi en la carcasa

La Raspberry Pi, siendo el corazón del módulo, requiere una estructura de soporte y protección adecuada. Con este propósito, se fijó la placa Raspberry Pi en la base preconfigurada de la carcasa. Se utilizaron anclajes y sistemas de fijación diseñados específicamente para este fin, garantizando así la estabilidad, seguridad y protección del microcontrolador dentro de su estructura.

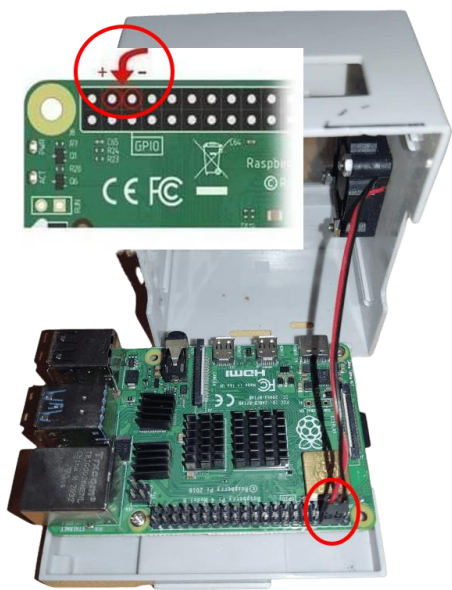


Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 10 Alojamiento de la Raspberry Pi dentro de la carcasa

2.9.5 Conexión del ventilador al GPIO de la Raspberry Pi

El ventilador, esencial para la refrigeración del sistema, necesita una fuente de alimentación constante y confiable. Por ello, con el objetivo de proporcionar alimentación eléctrica al mismo, se realizó la conexión del ventilador a los pines 5V y GND del conector GPIO de la Raspberry Pi. Esta conexión asegura una alimentación estable y eficiente al dispositivo de enfriamiento, permitiendo su operación constante y evitando posibles fallos por sobrecalentamiento.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 11 Conexión del ventilador al GPIO de la Raspberry Pi

2.9.6 Ensamblaje de la carcasa

La carcasa juega un papel fundamental en la protección del módulo contra interferencias externas y posibles daños. Con el objetivo de consolidar la estructura protectora del módulo, se ensambló la placa base de la carcasa para Raspberry con la tapa. Este ensamblaje garantiza un montaje sólido, robusto y resistente, protegiendo así todos los componentes internos del módulo.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 12 Proceso de ensamblaje de la carcasa protectora

2.9.7 Configuración del modem y chip 4G

La conectividad es esencial en sistemas de control y monitoreo remoto. Por ello, con el fin de establecer una conexión 4G robusta para la transmisión de datos, se configuró el modem Huawei-módem Wingle E8372h-609 4G LTE. Se insertó un chip 4G activado de Movistar en el modem, aprovechando su capacidad desbloqueada, lo que garantiza una interoperabilidad y una transmisión de datos eficiente y confiable.



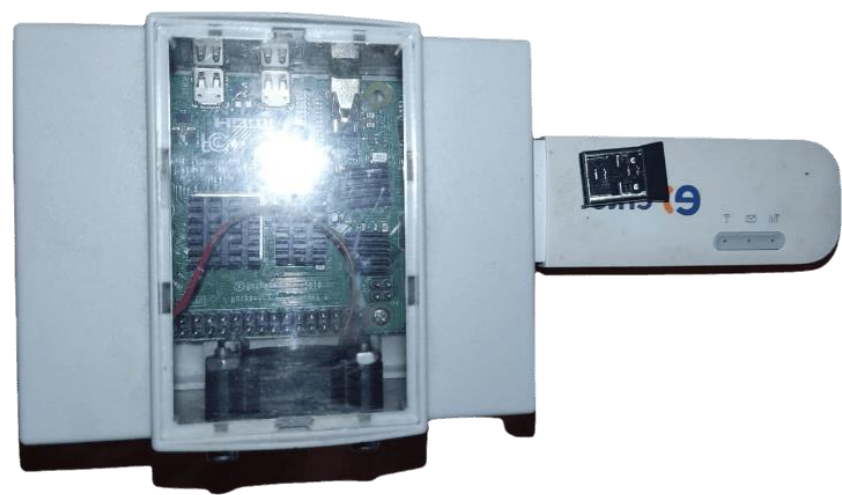
Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 13 Configuración del modem 4G Huawei

2.9.8 Conexión de dispositivos a la Raspberry Pi

Para garantizar una operatividad completa del módulo, es necesario integrar diversos dispositivos de entrada y comunicación. Con este propósito, se procedió a conectar el modem y el USB inalámbrico del mouse y teclado en los puertos USB de la

Raspberry Pi. Esta integración asegura una comunicación fluida y un funcionamiento óptimo de todos los dispositivos conectados al módulo.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 14 Integración de dispositivos externos a la Raspberry Pi

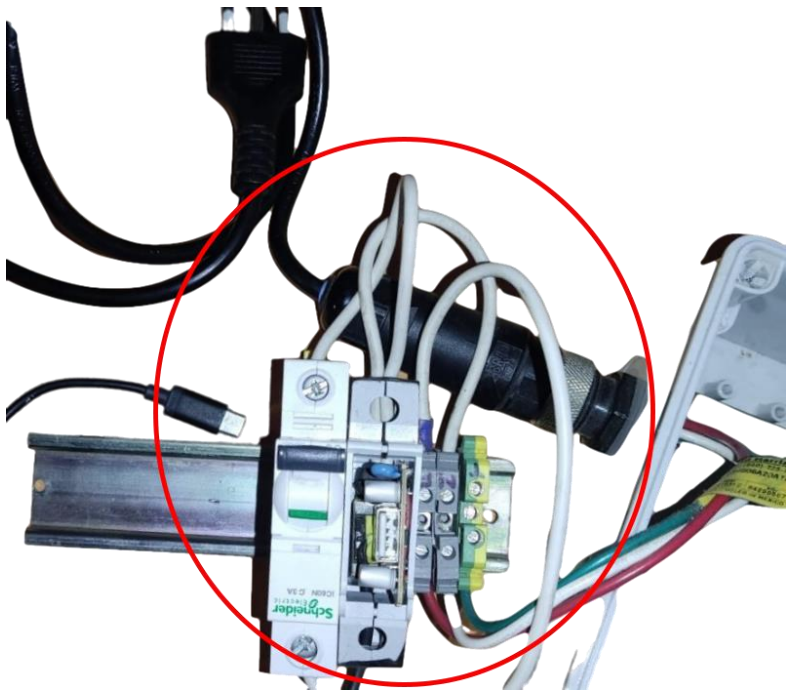
2.9.9 Cableado y montaje en la caja estanca

La protección contra factores ambientales es esencial para garantizar la longevidad y el buen funcionamiento del módulo. Con este objetivo, se realizó un cableado meticuloso utilizando un cable trifásico estándar. Se efectuaron las conexiones eléctricas necesarias, integrando el riel din en la placa de la caja estanca IP55. Las conexiones eléctricas se vincularon a las regletas y, posteriormente, al disparador automático, garantizando así protección contra sobrecargas y cortocircuitos.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 15 Procedimiento de cableado y montaje en la caja estanca



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 16 Procedimiento de cableado y montaje en la caja estanca

2.9.10 Finalización del montaje

La culminación del proceso de montaje es esencial para garantizar que el módulo esté listo para su operación. Una vez ensamblados todos los componentes, la Raspberry Pi se montó en el riel din. Posteriormente, se colocó la tapa superior de la caja estanca, sellando el interior y garantizando la protección integral del módulo contra factores externos y posibles daños.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 17 Pasos finales del montaje del módulo en el riel DIN



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 18 Montaje de tapa protectora

Con la ejecución rigurosa de estos procedimientos, el módulo queda listo para desempeñarse con eficacia y resistencia en contextos industriales, respaldado por una construcción meticulosa y técnicamente fundamentada.

2.10 Instalación y configuración del software

La concepción del módulo de mantenimiento remoto para transmisores de consistencia BTG marca una proyección prometedora hacia la optimización en la gestión de activos industriales. Este módulo, en su fase de diseño, aspira a combinar tecnologías punteras con estructuras resistentes, con el objetivo de brindar monitoreo y control de alta precisión sobre los dispositivos con los que se sincroniza. Su implementación, tanto a nivel de infraestructura física como de software, demandará una profunda comprensión de los fundamentos de la ingeniería de sistemas y una meticulosa ejecución técnica. En los pasajes siguientes, se esboza una guía pormenorizada sobre cómo se abordará la construcción y configuración de este módulo, subrayando los protocolos estandarizados y las directrices que orientarán su desarrollo en el ámbito del mantenimiento remoto industrial.

2.10.1 Configuración inicial

La concepción del módulo de mantenimiento remoto para transmisores de consistencia BTG marca una proyección prometedora hacia la optimización en la gestión de activos industriales. Este módulo, en su fase de diseño, aspira a combinar tecnologías punteras con estructuras resistentes, con el objetivo de brindar monitoreo y control de alta precisión sobre los dispositivos con los que se sincroniza. Su implementación, tanto a nivel de infraestructura física como de software, demandará una profunda comprensión de los fundamentos de la ingeniería de sistemas y una meticulosa ejecución técnica. En

los pasajes siguientes, se esboza una guía pormenorizada sobre cómo se abordará la construcción y configuración de este módulo, subrayando los protocolos estandarizados y las directrices que orientarán su desarrollo en el ámbito del mantenimiento remoto industrial.

2.10.2 Preparación inicial

Antes de aplicar energía al dispositivo, es esencial cargar el Sistema Operativo (SO) Raspberry Pi OS, anteriormente Raspbian. Este se instalará desde una fuente externa para mantener la flexibilidad en la elección del SO.

2.10.3 Herramientas de instalación

Se accede a www.raspberrypi.org/software y se descarga el instalador adecuado para su sistema de cómputo.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 19 Descarga sistema operativo

2.10.4 Selección del SO

En la misma página, desplácese a "See all download options" para explorar las versiones disponibles del SO.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 20 Descarga sistema operativo

2.10.5 Descarga de Raspberry Pi OS

En las opciones disponibles, seleccione la versión completa de Raspberry Pi OS para un conjunto completo de herramientas y funcionalidades.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 21 Descarga sistema operativo

2.10.6 Instalación en tarjeta Micro SD

Una vez descargado el SO y el instalador oficial, conecte la Micro SD al equipo. Inicie el gestor de instalación y siga el proceso de tres pasos: selección del SO, selección del medio de almacenamiento y escritura.

2.10.7 Selección del SO en el gestor

En la opción "operating System", el gestor mostrará los sistemas oficiales disponibles.

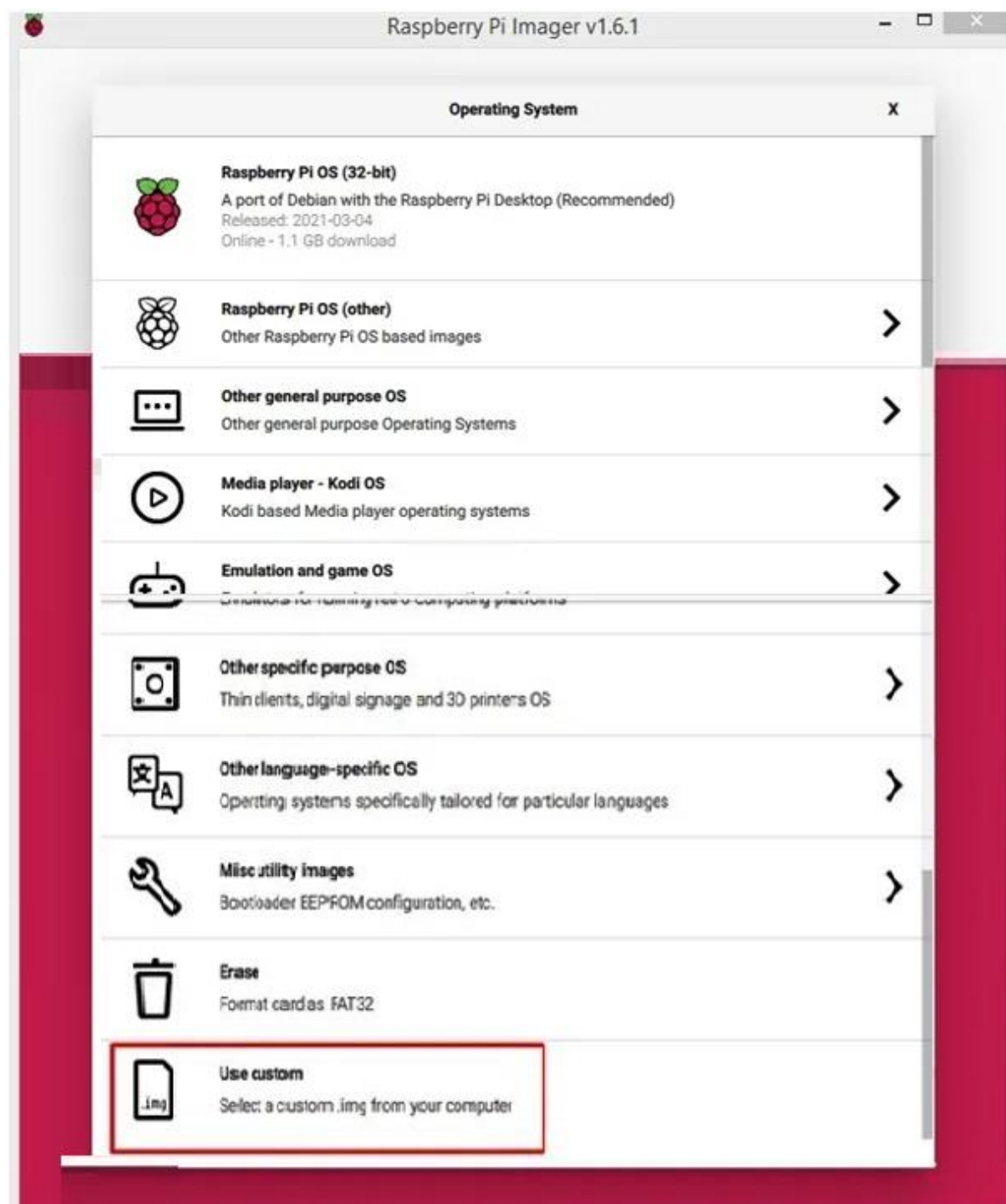


Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 22 Instalación sistema operativo en micro SD

2.10.8 Incorporación del SO personalizado

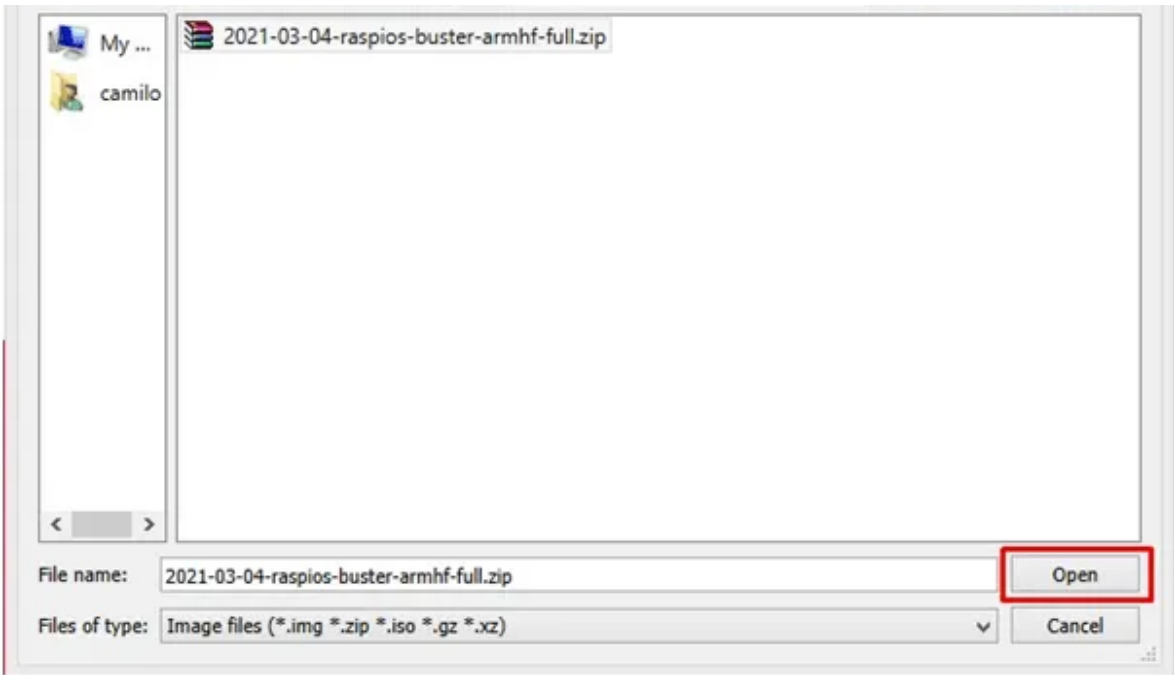
Se opta por "use custom" para buscar y seleccionar el archivo comprimido del SO que se descargó anteriormente.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 23 Instalación sistema operativo en micro SD

Posterior a esto abriremos el archivo que contiene el sistema operativo para la raspberry que se descargó anteriormente.

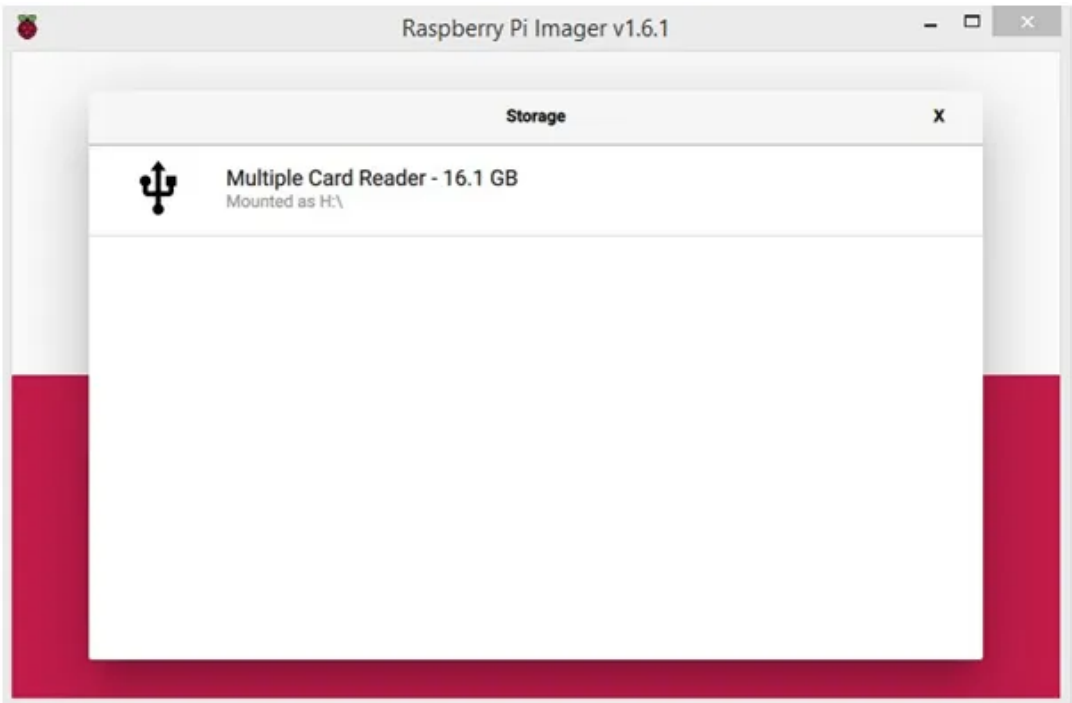


Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 24 Instalación sistema operativo en micro SD

2.10.9 Identificación de Almacenamiento

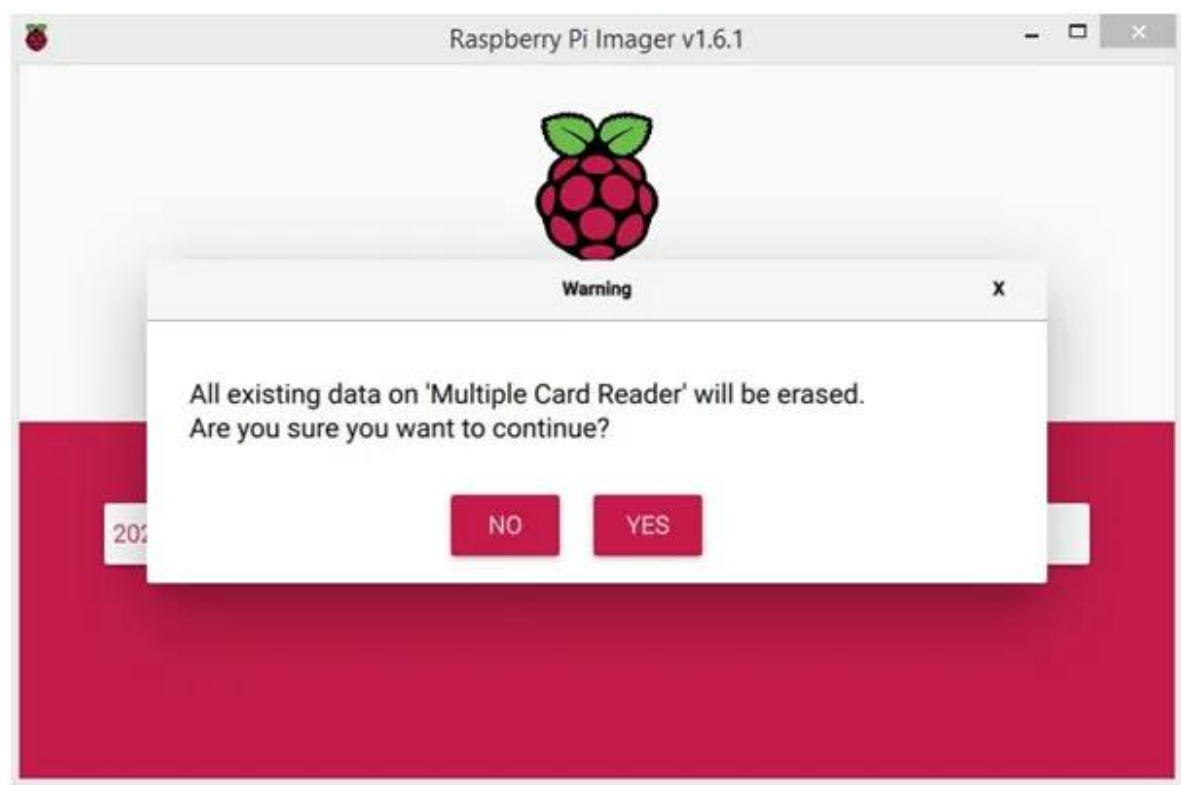
Al elegir "storage", identifique y seleccione cuidadosamente la tarjeta Micro SD para evitar pérdida de datos en otros dispositivos.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 25 Instalación sistema operativo en micro SD

Luego, deberemos hacer clic en "write", y se nos presentará una advertencia indicando que la tarjeta se limpiará por completo antes de la instalación. En ese momento, deberemos continuar seleccionando "YES".



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 26 Instalación sistema operativo en micro SD

2.10.10 Proceso de escritura

Una vez confirmadas las selecciones, inicie la escritura en la tarjeta. Este proceso se compone de dos fases: escritura y verificación.

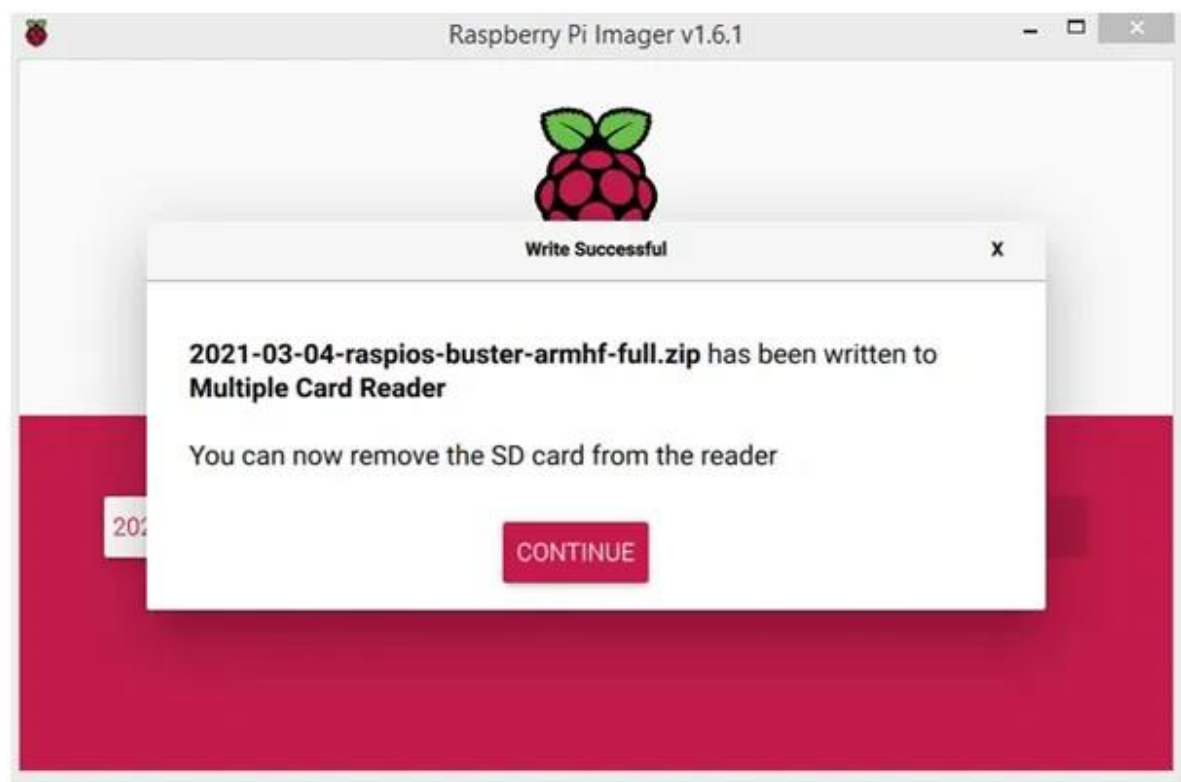


Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 27 Instalación sistema operativo en micro SD

2.10.11 Finalización y ejecución

Una vez finalizado el proceso, retire de manera segura la tarjeta Micro SD del equipo.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 28 Instalación sistema operativo en micro SD

2.10.12 Inicialización de Raspberry Pi

Inserte la tarjeta Micro SD en la Raspberry Pi, conecte el monitor y aplique energía. Espere a que el sistema cargue y muestre las opciones de configuración.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 29 Configuración inicial del sistema operativo

2.10.13 Establecimiento de parámetros regionales

Defina la ubicación y zona horaria según la ubicación geográfica del dispositivo.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 30 Configuración de parámetros regionales

2.10.14 Configuración de acceso

Se puede optar por mantener las credenciales por defecto (usuario "pi" y contraseña "raspberrry") o establecer nuevas. Aunque para tener una mejor ciberseguridad estos fueron cambiados y se estableció una contraseña que no pudiera ser hackeada

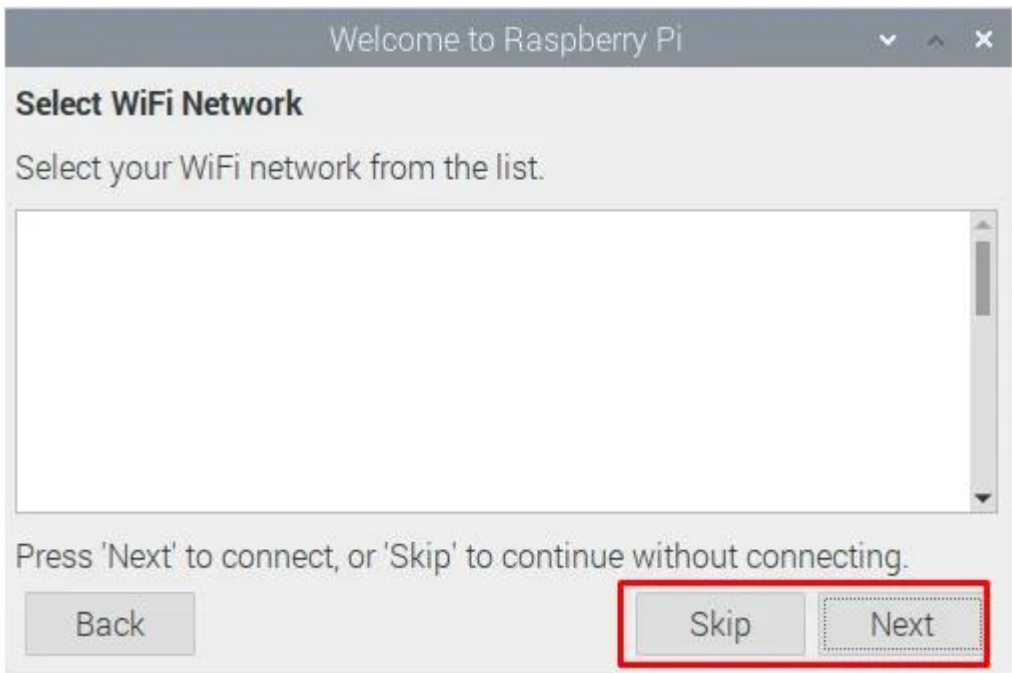


Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 31 Seguridad de la raspberrry

2.10.15 Configuración de red Wi-Fi

Si la conexión es inalámbrica, seleccione la red adecuada y proporcione la contraseña correspondiente.

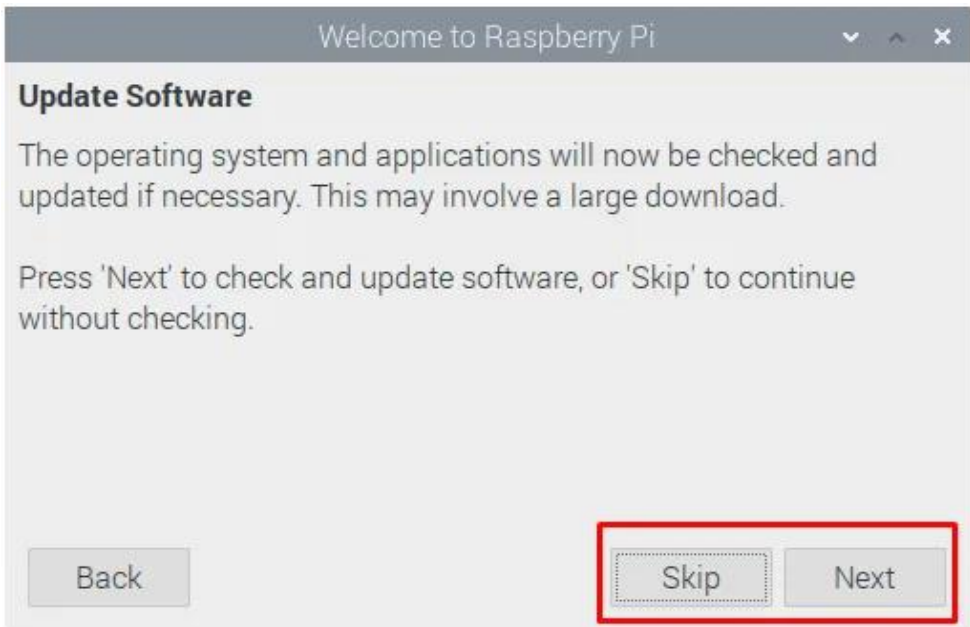


Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 32 Conexión a internet

2.10.16 Actualización del sistema

Es recomendable realizar una actualización del sistema para garantizar la última versión y correcciones de seguridad.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 33 Actualización del software

2.10.17 Reinicio post-configuración

Una vez finalizada la configuración inicial, reinicie el sistema para que los cambios surtan efecto.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 34 Finalización de la instalación inicial

2.10.18 Acceso a la terminal

A través del icono de terminal en la barra de tareas, acceda al mismo para ejecutar comandos directos en el sistema.

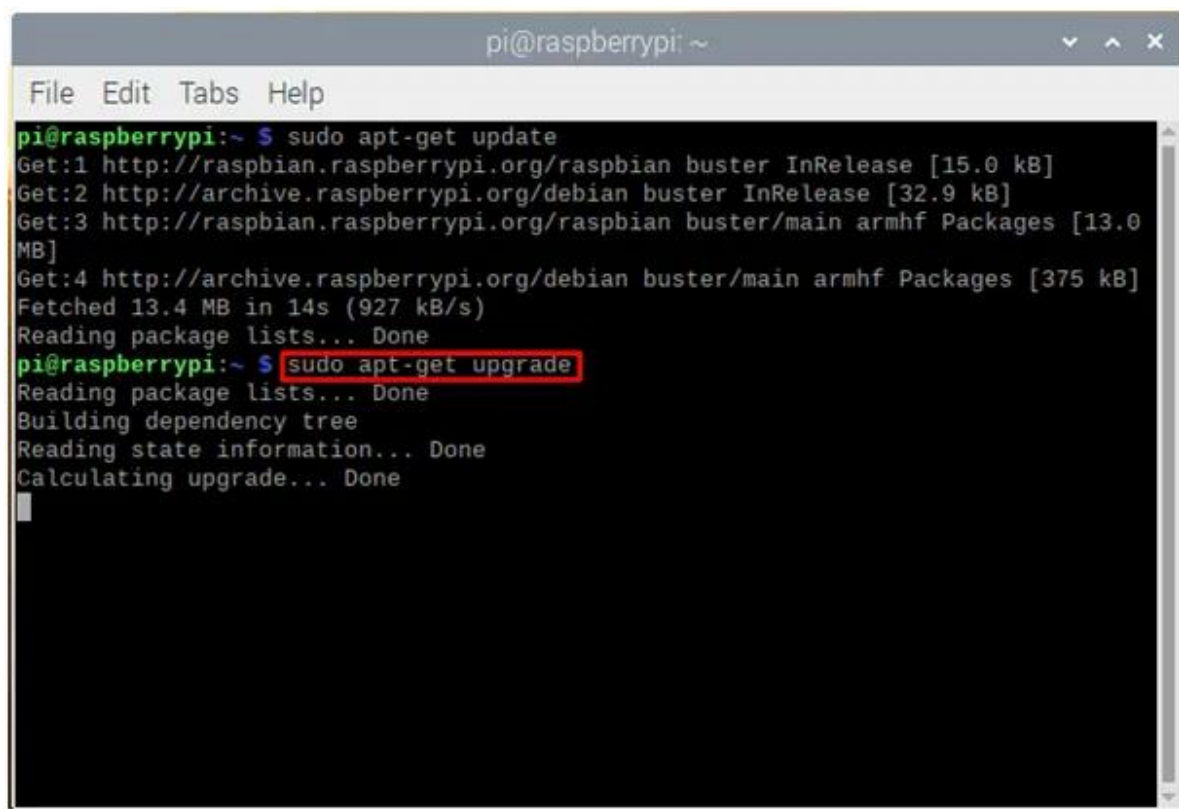


Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 35 Escritorio inicial de la raspberry

2.10.19 Actualización preliminar

Antes de cualquier instalación, ejecute una actualización de repositorios mediante "sudo apt-get update".



Fuente: Fotografía de elaboración propia

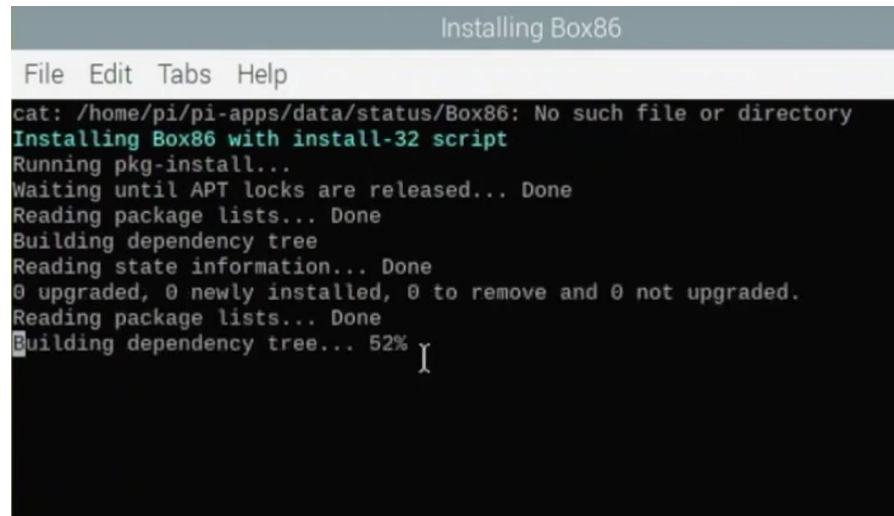
Figura 36 Actualización del sistema

2.10.20 Actualización del sistema

Mediante "sudo apt-get upgrade", se procede a actualizar el sistema y las aplicaciones instaladas, asegurando las últimas versiones y correcciones.

2.10.21 Instalación de Box86

Se procederá a instalar Box86 con el objetivo de habilitar la ejecución de aplicaciones x86 en Raspberry.

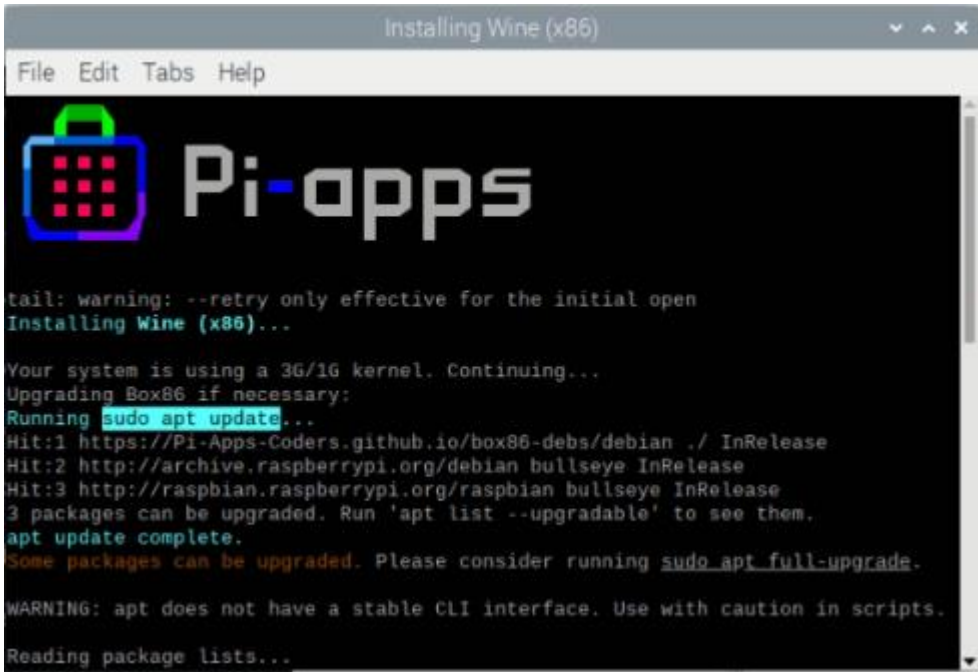


Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 37 Instalación de Box86

2.10.22 Instalación de Wine

Se llevará a cabo la instalación de Wine con la finalidad de emular aplicaciones de Windows en Raspberry.

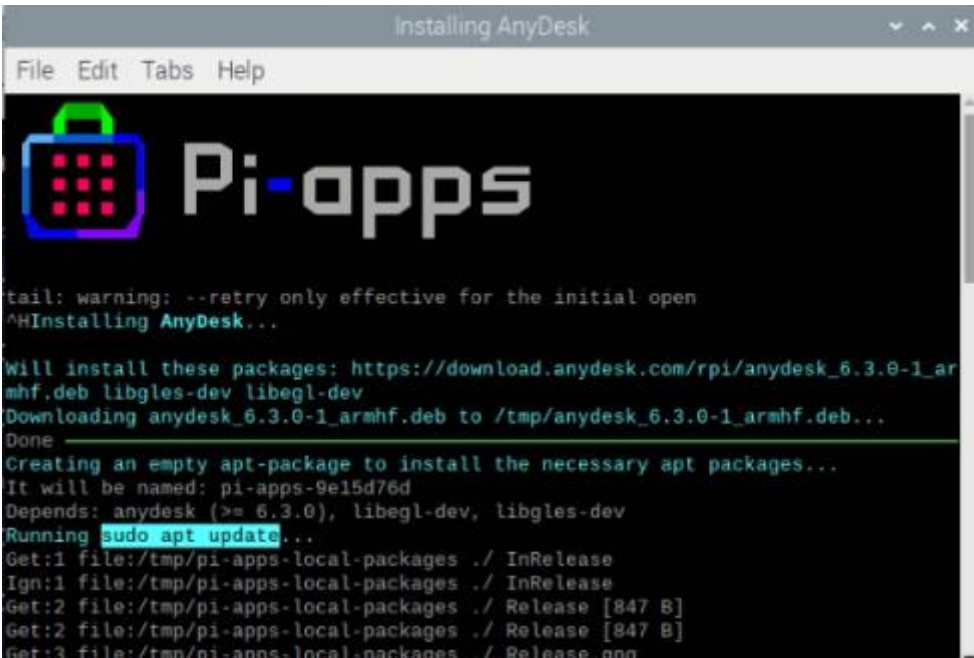


Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 38 Instalación de wine

2.10.23 Instalación de AnyDesk

El software AnyDesk, esencial para proporcionar capacidades de escritorio remoto en tiempo real, fue instalado directamente en la Raspberry Pi. Una vez instalado, se configuró para operar como un servidor de escritorio remoto, permitiendo conexiones entrantes sin requerir aprobación explícita del dispositivo receptor.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 39 Instalación AnyDesk

Este sistema se asocia con un código único, el 1957882647, que permanece constante y permite a cualquier equipo autorizado ingresar y controlar la Raspberry Pi en cualquier momento, siempre y cuando haya conexión a internet en el dispositivo.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

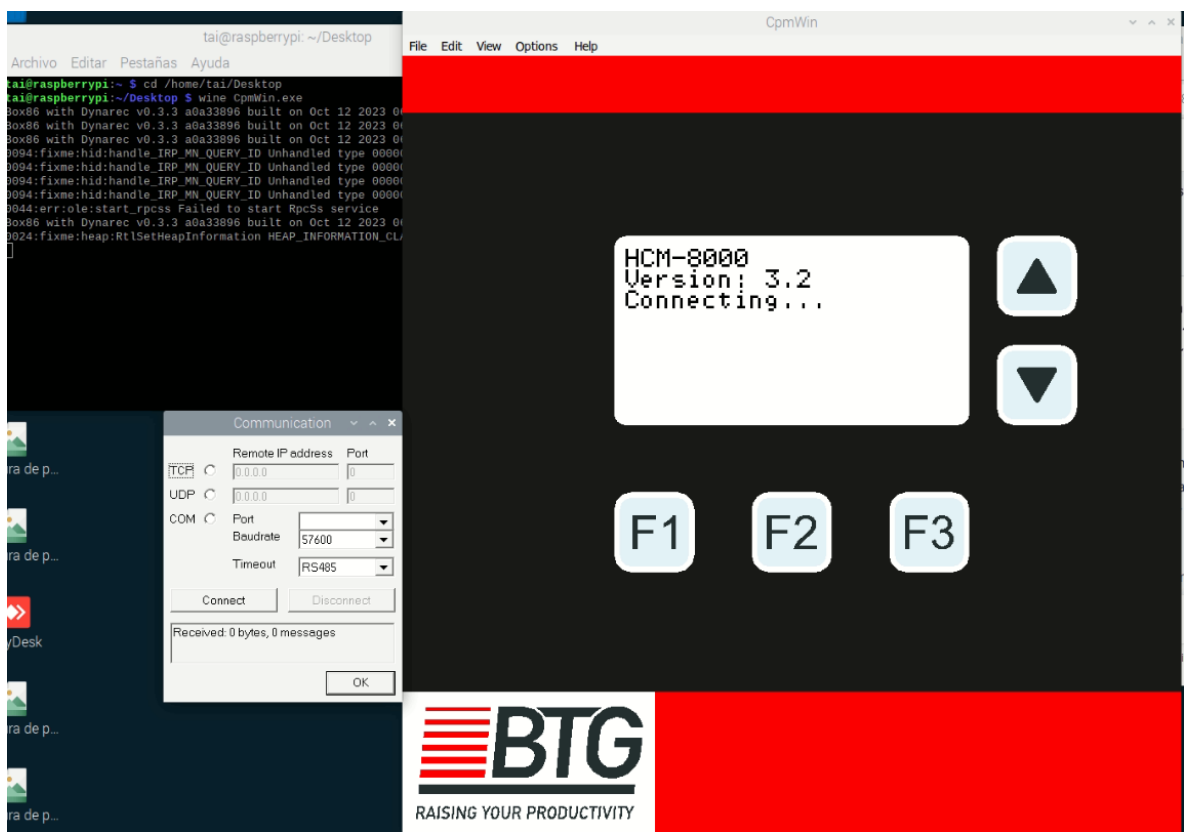
Figura 40 Código para conexión remota

2.10.24 Instalación de wincpm.exe

El software wincpm.exe, esencial para la calibración en tiempo real de la máquina, fue transferido y almacenado en la Raspberry Pi. Gracias a las herramientas previamente instaladas (Box86 y Wine), este software puede ser ejecutado directamente en el dispositivo.

Debido a que los ejecutables .exe no son nativos del sistema operativo pi os se debe abrir una terminal y ejecutar los comandos /home/tai/Desktop y wine CpmWin.exe

para ejecutar el archivo, esto abrirá el programa para poder visualizar la consistencia y realizar la calibración del transmisor de consistencia.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 41 Software de calibración CPMWin.exe

2.10.25 Automatización de la ejecución de CpmWin.exe en Raspberry Pi

Para lograr una ejecución sin la necesidad de introducir código manualmente, se creará un archivo ejecutable en el escritorio de la Raspberry Pi. Al hacer clic en este archivo, se ejecutará automáticamente la aplicación de calibración **CpmWin.exe**. Inicialmente, se generará un archivo de script denominado **run_CpmWin.sh**, que contendrá las instrucciones precisas para navegar al directorio **/home/tai/Desktop** y lanzar el archivo **CpmWin.exe** utilizando Wine. Una vez creado, se otorgarán permisos de ejecución al script. Posteriormente, se diseñará un lanzador de escritorio llamado **CpmWin.desktop** que apuntará al script antes mencionado. Al concluir estos pasos y tras una actualización o reinicio del escritorio de la Raspberry Pi, estará presente un icono denominado "CpmWin". En futuras interacciones, al seleccionar dicho icono, se activará el script **run_CpmWin.sh**, facilitando así la ejecución de **CpmWin.exe** con Wine desde el directorio especificado.

2.11 Configuración del módulo para operación ininterrumpida

Se implementan en el software las consideraciones técnicas que aseguran que la Raspberry Pi no solo funcione de manera continua, sino que también esté perfectamente sintonizada para operaciones de calibración en tiempo real, garantizando así un rendimiento superior y una interacción sin contratiempos con el software específico de calibración

2.12 Automatización de aplicaciones en el inicio

Para garantizar una operatividad continua y autónoma, especialmente después de reinicios forzosos del módulo, se implementará un proceso que asegure la ejecución automática de las aplicaciones **CpmWin.exe** y **AnyDesk** al iniciar la Raspberry Pi.

Este proceso se realizará mediante **Crontab**, una herramienta que permite programar tareas recurrentes. Se accederá a **Crontab** a través de una terminal y se agregarán entradas específicas para ambas aplicaciones.

Al finalizar este proceso, se añadirán líneas de comando que indicarán al sistema ejecutar tanto el script **run_CpmWin.sh** (que a su vez lanza **CpmWin.exe**) como **AnyDesk** cada vez que el dispositivo se inicie.

Esta automatización no sólo facilita la recopilación ininterrumpida de datos por parte de **CpmWin.exe**, sino que también asegura que **AnyDesk** esté listo para aceptar conexiones remotas inmediatamente después del arranque. En resumen, esta configuración garantiza que, en caso de interrupciones imprevistas, el módulo Raspberry Pi retome rápidamente sus operaciones y esté listo para recibir datos y conexiones remotas sin intervención manual.

2.13 Actualización y manejo de EEPROM en Raspberry Pi

El Raspberry Pi 4, a diferencia de sus predecesores, emplea una EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) para conservar la configuración de arranque.

Esta memoria, además de ser reprogramable eléctricamente, es esencial para garantizar un funcionamiento óptimo y un reinicio adecuado del dispositivo, especialmente después de interrupciones de energía.

Por lo tanto, es imperativo asegurarse de que la EEPROM esté actualizada con la última versión de firmware disponible. Además, es crucial configurarla adecuadamente para que el Raspberry Pi 4 reinicie de manera autónoma después de un corte de energía,

garantizando así una recuperación rápida y evitando tiempos de inactividad prolongados o posibles fallos en el sistema.

La actualización y configuración adecuada de la EEPROM no solo potencia la resiliencia del dispositivo frente a interrupciones, sino que también optimiza su rendimiento y estabilidad general.

2.13.1 Optimización para calibración en tiempo real

La configuración de software que se realizó anteriormente prepara técnicamente al módulo para su correcto funcionamiento, Lo que permite llevar a cabo la calibración en tiempo real de forma correcta y asegura una interacción precisa que se adapta de manera autónoma para solucionar fallos comunes en este tipo de dispositivos.

3. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO E INSTALACIÓN.

En el contexto de la presente investigación, se establecen tres pruebas críticas para validar la funcionalidad y precisión del sistema integrado compuesto por el TCR, CPM, Raspberry y dispositivos de acceso remoto. La primera, denominada Prueba de Conexión, tiene como propósito asegurar una transmisión ininterrumpida de datos entre los componentes, garantizando que las comunicaciones se efectúen sin fallos ni latencias que puedan comprometer la integridad de la información.

A continuación, la Prueba de Concordancia de Propiedades Físicas (Consistencia), busca corroborar que el valor de consistencia real transmitido al CPM desde el TCR sea idéntico al valor reflejado y procesado por la Raspberry, asegurando así una correspondencia exacta entre las mediciones y su representación digital.

Por último, la Prueba de Calibración a Distancia se centra en validar que las modificaciones paramétricas efectuadas desde un dispositivo remoto, tal como un computador, sean efectivamente transmitidas y aplicadas al CPM y, por ende, al TCR. La confluencia de estas pruebas es fundamental para certificar que el sistema no sólo opera con precisión y confiabilidad, sino que también responde adecuadamente a las intervenciones realizadas desde ubicaciones remotas, consolidando así su aplicabilidad en escenarios industriales.

3.1 Prueba de conexión

El objetivo primordial de la Prueba de Conexión es validar la integridad y continuidad de la comunicación entre los componentes del sistema: TCR, CPM y Raspberry.

En un contexto donde la transmisión eficiente de datos es esencial, esta prueba se centra en asegurar que los paquetes de datos se transmitan sin pérdidas, retrasos ni corrupciones a lo largo de toda la cadena de comunicación. Utilizando el protocolo específico del puerto COM1 y el medio físico proporcionado por el cable RS485, se busca confirmar que cada componente reciba y procese la información del anterior de manera coherente y en tiempo real.

Cualquier interrupción o anomalía en esta transmisión podría resultar en errores de lectura o calibración, por lo que la verificación de una comunicación robusta y sin fallos es esencial para garantizar la precisión y confiabilidad del sistema en su conjunto.

La Prueba de Conexión inicia con la interconexión del TCR y la CPM, dos componentes esenciales en el sistema de medición diseñado por BTG. Esta fase preliminar es crucial para validar que el TCR transmita efectivamente las mediciones de consistencia a la CPM. Una vez que el TCR se encuentra operativo, genera y envía valores representativos de la consistencia, los cuales son interpretados y visualizados en la interfaz

de la CPM. Esta transmisión de datos garantiza que el sistema TCR/CPM esté correctamente calibrado y funcionando a la par.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 42 Sistema TCR/CPM

Posteriormente, se establece la conexión entre la CPM y la Raspberry utilizando un cable RS485, estándar conocido por su confiabilidad en comunicaciones industriales. Para validar esta conexión en un entorno remoto, se emplea la herramienta AnyDesk, que permite el acceso al escritorio de la Raspberry desde un PC. Una vez establecida esta conexión remota, se inicia el programa CPMWIN.exe, diseñado específicamente para monitorear y verificar la comunicación entre la TCR/CPM y dispositivos conectados, en este caso, la Raspberry.

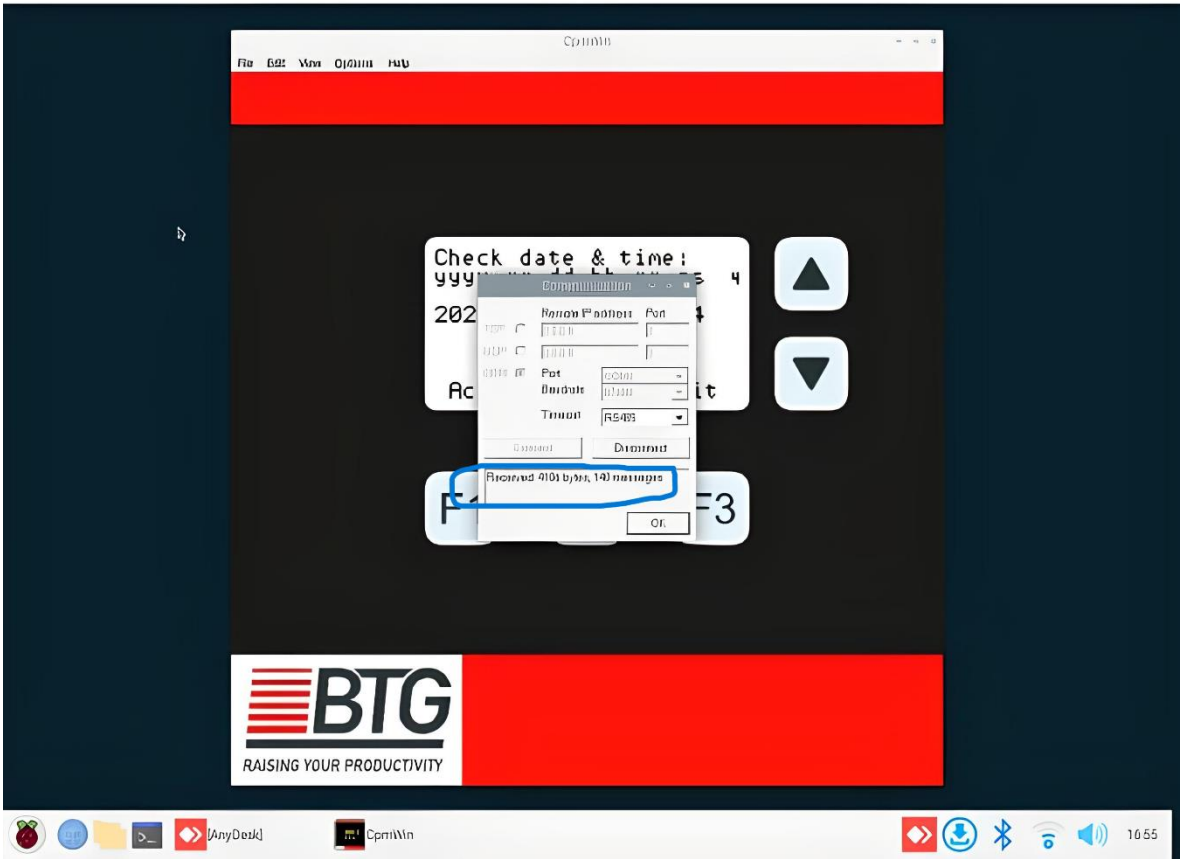


Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 43 Interfaz CPMWin.exe

Dentro de CPMWIN.exe, se accede al módulo encargado de supervisar la conexión. Un indicador clave de una comunicación exitosa es la detección del puerto COM1, que denota una transmisión efectiva de paquetes entre los dispositivos. En caso de no detectar el puerto COM1, esto sugiere problemas de comunicación entre la TCR y la Raspberry. Sin embargo, si la conexión es exitosa, se procede a la fase de validación final a través del RS485.

Para confirmar la integridad de la comunicación, se monitorizan los mensajes entre la máquina y la Raspberry. Estos mensajes, representados en bytes, indican que la transmisión de datos se está llevando a cabo sin interrupciones, confirmándose así el éxito de la prueba.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 44 Recepción de datos TCR/CPM a Raspberry

3.2 Prueba de concordancia de consistencia

La Prueba de Concordancia de Propiedades Físicas (Consistencia) es esencial para garantizar que el sistema TCR/CPM no solo transmiten datos, sino que estos datos reflejan con precisión la realidad física del medio en el que el TCR está inmerso. Para realizar esta validación de manera exhaustiva, el TCR se sumerge en un vaso de papel cortado y agua, para simular la celulosa.

Esta similitud de medio garantiza que el TCR pueda reconocer y medir adecuadamente variaciones en la consistencia, asegurando su versatilidad y precisión en la aplicación industrial.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 45 Conexión del módulo a la máquina

Una vez sumergido el TCR en cada líquido de prueba, se procede a monitorizar las mediciones de consistencia que este transmite a la CPM. Es imperativo que los valores transmitidos sean consistentes con las propiedades físicas esperadas de cada líquido, validando así la capacidad del TCR de interpretar correctamente su entorno y generar datos representativos.

Cualquier desviación entre los valores esperados y los obtenidos podría indicar problemas de calibración, sensibilidad o interpretación por parte del TCR.

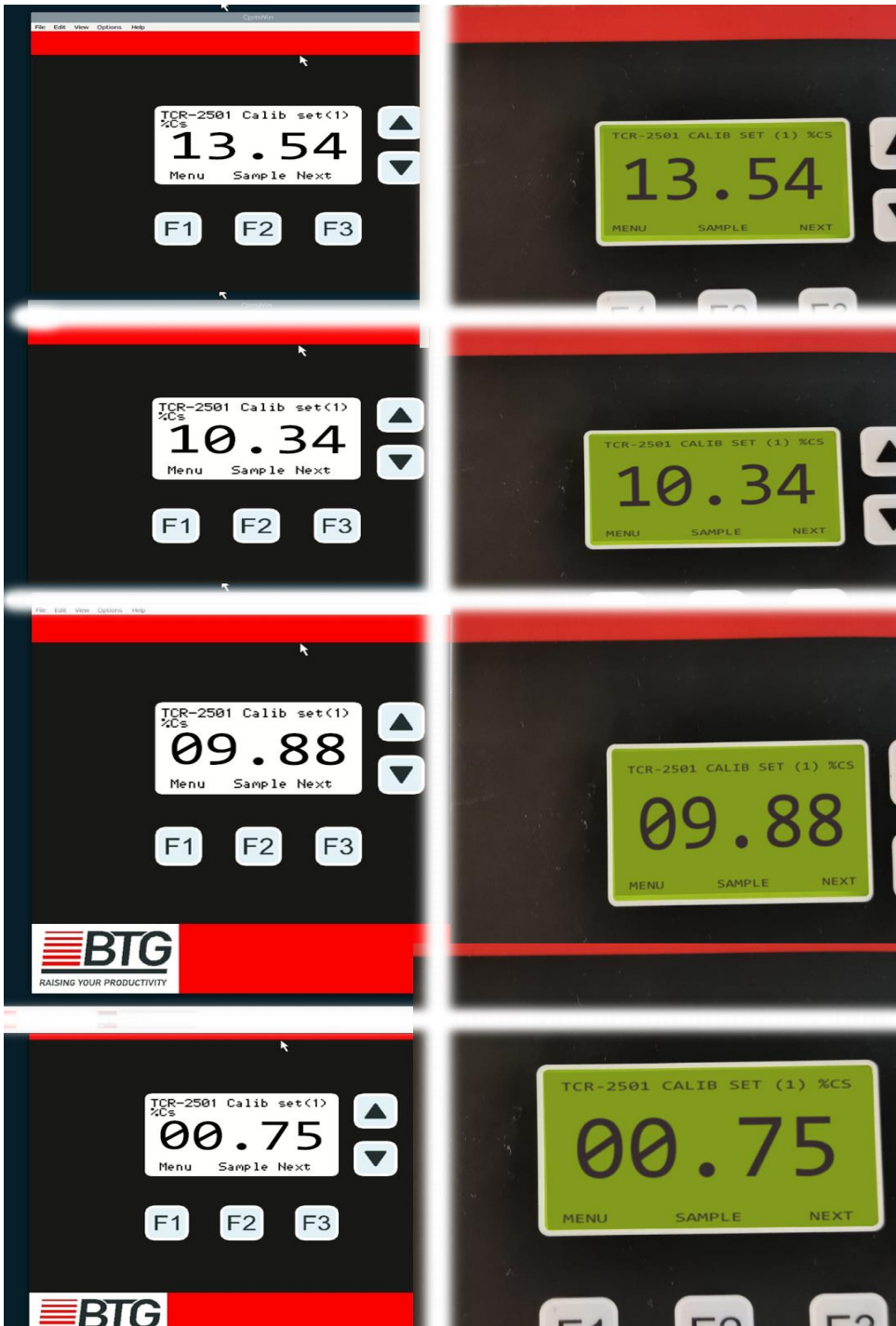
ETAPA DEL PROCESO	DESCRIPCIÓN	CONSISTENCIA A (%)	CONSISTENCIA RASPBERRY (%)
Pulpa recién cocida	Después del proceso de cocción, se usan productos químicos para separar las fibras de celulosa de los otros componentes de la madera.	10% - 15%	10.2% - 14.8%
Salida de lavadores de pulpa	Después del lavado para eliminar los productos químicos residuales y los componentes solubles de la madera.	10% - 12%	10.1% - 12.2%
Pulpa deslignificada	Después de la etapa de blanqueo, se eliminan los restos de lignina y otros componentes.	10% - 15%	9.8% - 15.1%
Máquina de papel	Antes de que la pulpa se forme en hojas de papel, se diluye a una consistencia.	0.5% - 1%	0.6% - 0.9%

Fuente: Elaboración propia de las mediciones realizadas a la celulosa en distintas etapas del proceso.

Tabla 2 *Consistencia de la celulosa durante el proceso y la relación con la raspberry*

Finalmente, se lleva a cabo una comparación directa entre los valores mostrados por el TCR y aquellos reflejados en la CPM. Esta etapa es crucial, ya que cualquier discrepancia entre estos dos componentes podría resultar en decisiones erróneas basadas en mediciones inexactas.

La concordancia perfecta entre el TCR y la CPM confirma que no solo el sensor opera con precisión, sino que la transmisión y representación de esos datos en la CPM es fidedigna, consolidando la confiabilidad del sistema en su totalidad.



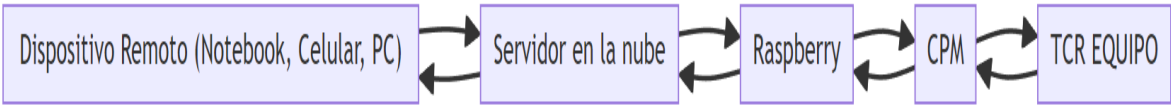
Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 46 Comparación de resultados de consistencia Máquina/Módulo

3.3 Prueba de calibración remota

En el panorama actual de la industria moderna, la capacidad de calibrar y configurar dispositivos a distancia se ha convertido en una herramienta invaluable. La Prueba de Calibración a Distancia ha sido diseñada con el propósito principal de verificar esta capacidad dentro del sistema integrado que comprende el TCR, la CPM y la Raspberry.

Su objetivo es claro: asegurar que las configuraciones y calibraciones realizadas desde un dispositivo remoto con acceso a internet, ya sea un notebook, celular o PC, se reflejan de manera precisa y fidedigna en la CPM a través de la interfaz de la Raspberry.

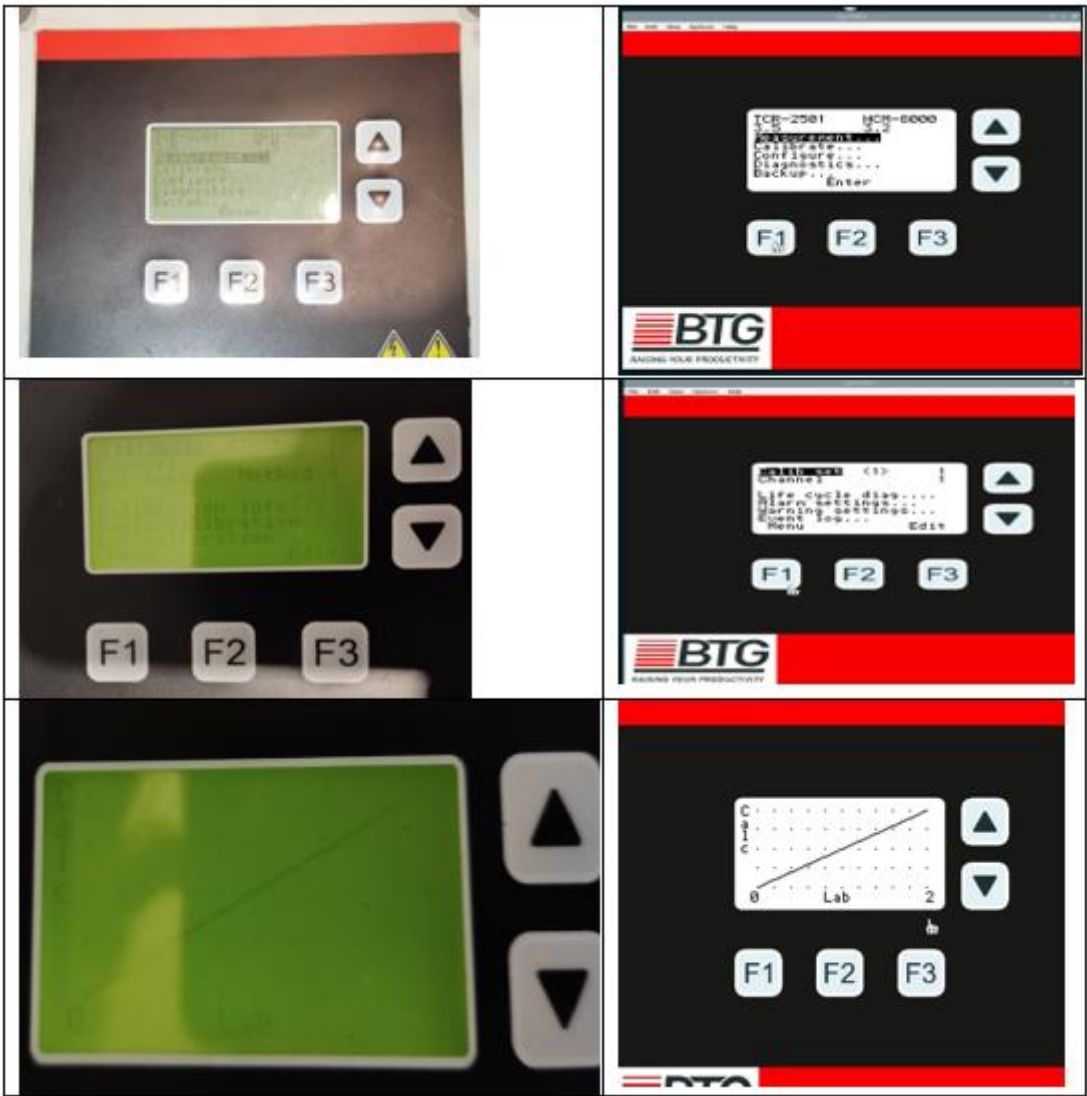


Fuente: Diagrama de elaboración propia

Figura 47 Flujo de datos del módulo funcional

El procedimiento para esta prueba se inicia con la introducción de valores específicos o configuraciones de calibración desde un dispositivo remoto. Estas instrucciones se transmiten por la red hasta la Raspberry, que actúa como puente de comunicación entre el dispositivo remoto y la CPM. Una vez que los datos han sido enviados, es crucial observar con detalle la interfaz de la CPM para detectar cambios o ajustes.

La Raspberry debe procesar y transmitir estas instrucciones sin demora, garantizando que la CPM refleje las configuraciones exactas enviadas desde el dispositivo remoto.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 48 Comparación máquina/módulo de la calibración remota

Los resultados esperados de esta prueba son inequívocos: se deben observar cambios en la CPM que coincidan exactamente con las instrucciones enviadas desde el dispositivo remoto.

Cualquier desviación o retraso en la representación de estos cambios podría indicar problemas en la transmisión de datos o en la interpretación de las instrucciones por parte de la Raspberry o la CPM. Una correspondencia precisa entre las instrucciones enviadas y los cambios observados no sólo validará la eficiencia del sistema, sino que también reforzará la confiabilidad y versatilidad del sistema en escenarios industriales en tiempo real.

3.4 Conclusiones de las pruebas preliminares

Al realizar las pruebas al módulo es posible concluir que las pruebas de conexión, concordancia de las propiedades físicas y la calibración a distancia funcionaron conforme a los resultados esperados de este prototipo.

Logrando que el sistema pudiera transmitir de forma continua, en tiempo real y desde cualquier lugar mediciones exactas, además de poder aplicar una correcta calibración remota lo que confirma la funcionalidad del módulo en los términos de medición y calibración de forma remota y en tiempo real.

3.5 Instalación del módulo en CMPC Maule

En el contexto de la optimización de sistemas de medición, se efectuó la integración del módulo de calibración remota en las instalaciones de la planta CMPC Maule. Este módulo, diseñado para mejorar y facilitar el proceso de ajuste y monitoreo, se incorporó directamente al motor MEK-2500, el cual tiene la función de transmitir los valores de consistencia de la celulosa. Esta implementación estratégica tuvo lugar en la etapa final del proceso, justo antes de que las pulpas se transformen en hojas de cartulina, asegurando así un control preciso en un momento crítico de la producción.

Es esencial subrayar que, a lo largo de la instalación, se siguieron meticulosamente todas las medidas de seguridad y protocolos prescritos por CMPC Maule. Estas directrices no sólo garantizan la seguridad del personal técnico encargado de la integración, sino que también aseguran que el módulo de calibración remota y el motor MEK-2500 operen sin interrupciones ni contratiempos, manteniendo la fluidez del proceso productivo de la planta.

El emplazamiento específico para la integración del módulo fue seleccionado con deliberación. Se optó por colocarlo en proximidad a la CPM ya establecida en la planta, la cual monitorea una tubería de pulpa en su última etapa antes de su conversión a cartulina. Esta configuración colindante facilita una correlación y análisis directo de los datos entre el nuevo módulo de calibración y el sistema preexistente, lo que permite una supervisión más detallada y coherente del proceso y garantiza uniformidad en las mediciones y resultados.

3.6 Limitaciones del módulo y propuesta de mejora

En este apartado, se aborda una limitación crítica del módulo desarrollado para la calibración remota de transmisores BTG y se presenta una propuesta innovadora para superar este desafío.

Una de las restricciones identificadas es que los transmisores BTG no permiten la historización de los valores de consistencia, debido a que esta función no está integrada en el sistema que BTG diseñó.

A pesar de la implementación del módulo, no es posible visualizar un historial de los valores de consistencia en diferentes fechas. Sin embargo, se propone una solución que consiste en la creación de una base de datos que histórico todos los datos obtenidos al interceptar o recolectar los paquetes de datos enviados a través del puerto COM1 desde el sistema BTG, pasando a través del módulo basado en Raspberry Pi. Al lograr recolectar y almacenar estos datos en una base de datos conectada a Google, se podrían visualizar en cualquier periodo de tiempo, proporcionando una visión panorámica de la consistencia y facilitando futuras mejoras en el mantenimiento de los equipos y la calidad de la celulosa.

3.6.1 Identificación de la limitación principal del módulo

El desarrollo del módulo para la calibración remota de transmisores BTG ha sido un avance significativo en la optimización de procesos industriales. Sin embargo, al profundizar en su funcionamiento y capacidades, se ha identificado una limitación fundamental que afecta su eficiencia y aplicabilidad. Esta limitación radica en la incapacidad del módulo para historiar los valores de consistencia. A pesar de su diseño avanzado y las capacidades que ofrece, esta carencia se presenta debido a que la función de historización no está integrada en el sistema original desarrollado por BTG.

Esta ausencia de historización representa un desafío en el monitoreo y análisis de los valores de consistencia a lo largo del tiempo. Los usuarios y técnicos no pueden visualizar un historial de estos valores en diferentes fechas, lo que limita la capacidad de realizar análisis detallados y tomar decisiones informadas basadas en tendencias y patrones históricos. Esta limitación se vuelve aún más evidente cuando se considera la importancia de la consistencia en la calidad de la celulosa y el mantenimiento de los equipos.

La falta de esta función esencial en el módulo se debe a que los transmisores de BTG no fueron diseñados con la capacidad de historiar los valores de consistencia. Aunque el módulo ha sido desarrollado para mejorar y expandir las capacidades de estos transmisores, no puede superar por sí solo las limitaciones inherentes al sistema original de BTG.

Es esencial reconocer que, aunque el módulo ofrece muchas ventajas y capacidades adicionales, no puede compensar completamente las carencias del sistema original.

La identificación de esta limitación es crucial para el desarrollo futuro y la mejora del módulo. Al reconocer y entender esta carencia, se pueden explorar soluciones y estrategias para superarla, garantizando que el módulo no solo cumpla con sus funciones actuales, sino que también evolucione para satisfacer las necesidades cambiantes de la industria y los usuarios.

3.6.2 Propuesta para la historización continua de parámetros de consistencia

La necesidad de historiar las mediciones de consistencia surge de la limitación identificada en el módulo desarrollado para la calibración remota de transmisores BTG. A pesar de las capacidades avanzadas del módulo, la falta de una función de historización impide un análisis detallado y retrospectivo de los valores de consistencia. Para abordar esta carencia, se propone una estrategia innovadora que aprovecha la tecnología moderna y las herramientas en la nube.

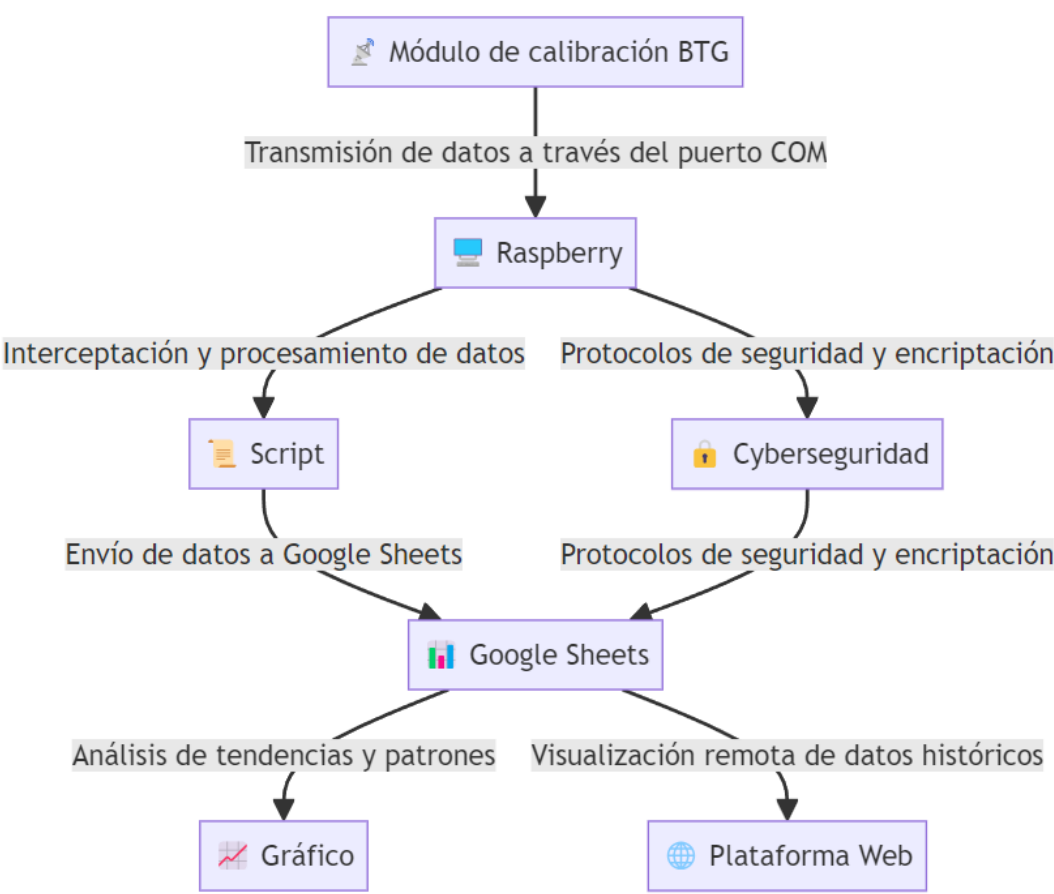
La esencia de esta propuesta radica en la interceptación de datos transmitidos a través del puerto COM del sistema de transmisiones BTG. Utilizando la Raspberry Pi como intermediario, es posible "escuchar" o monitorear este puerto en tiempo real, identificando y extrayendo datos relevantes relacionados con la consistencia. Un script especialmente diseñado para esta tarea se encargará de procesar estos datos, preparándose para su posterior almacenamiento.

Google Sheets, una herramienta en la nube versátil y ampliamente accesible, se presenta como la plataforma ideal para almacenar estos datos. El script enviará los datos interceptados directamente a una hoja de cálculo en Google Sheets, creando así un registro histórico en tiempo real. Esta integración permite no solo el almacenamiento de datos, sino también su visualización mediante gráficos y tablas, facilitando el análisis de tendencias y patrones en las mediciones de consistencia.

Además de la visualización, la propuesta también enfatiza la importancia de la seguridad de los datos. Al transferir información entre el sistema BTG, la Raspberry Pi y Google Sheets, es esencial garantizar la integridad y confidencialidad de los datos. La implementación de protocolos de seguridad, encriptación y autenticación asegurará que los datos estén protegidos en cada etapa del proceso.

El desarrollo del script requerirá un profundo conocimiento en lenguajes de programación adecuados para la tarea, como Python o JavaScript. Este script no solo deberá ser capaz de interceptar los datos, sino también de procesarlos, filtrar la información relevante y enviarla a Google Sheets de manera eficiente. La automatización será clave, permitiendo que el proceso se ejecute en segundo plano sin intervención humana.

Adicionalmente, para facilitar el acceso remoto a estos datos, se propone la creación de una página web o plataforma que se conecte directamente con Google Sheets. Esta página permitirá a los usuarios visualizar los datos históricos, gráficos y cualquier otro análisis relevante desde cualquier lugar y en cualquier momento. La interfaz de usuario deberá ser intuitiva y amigable, garantizando que incluso aquellos sin experiencia técnica puedan comprender y utilizar la plataforma.



Fuente: Fotografía de elaboración propia

Figura 49 Flujo de datos de la propuesta de monitoreo avanzado para mediciones de consistencia

En conclusión, la propuesta para la historización continua de mediciones de consistencia ofrece una solución integral que aborda la limitación identificada en el módulo y aprovecha las capacidades de las herramientas modernas.

Al combinar la tecnología de la Raspberry Pi con la versatilidad de Google Sheets y el desarrollo de una plataforma web dedicada, se presenta una estrategia robusta que promete mejorar significativamente el monitoreo y análisis de la consistencia en la industria.

3.6.3 Ventajas proyectadas tras la implementación de mejoras en el módulo

La implementación de una mejora significativa en el módulo para la calibración remota de transmisores BTG promete ser un catalizador en la evolución del mantenimiento industrial predictivo. Una ventaja cardinal es la monitorización en tiempo real de las mediciones de consistencia. Esta capacidad de observación ininterrumpida facilita la identificación proactiva de tendencias y desviaciones, permitiendo intervenciones precisas que minimizan el tiempo de inactividad y optimizan la gestión de recursos.

Desde la óptica del mantenimiento industrial predictivo, esta mejora potencia la anticipación de anomalías y desgastes prematuros. Al disponer de un registro exhaustivo y continuo de las mediciones, se pueden discernir patrones y ciclos operativos que, de otro modo, pasarían desapercibidos. Esta capacidad de análisis predictivo, fundamentada en datos empíricos, posibilita una planificación de mantenimiento más estratégica, maximizando la eficiencia operacional y prolongando la operatividad de los equipos.

El enriquecimiento de datos a través de la historización continua es una piedra angular para el análisis avanzado. Con un arsenal de datos históricos a disposición, se pueden emplear técnicas sofisticadas de análisis, como algoritmos de aprendizaje automático, para modelar y prever comportamientos operativos futuros. Esta proyección, alimentada por datos granulares y coherentes, puede inducir mejoras sustanciales en la calidad del producto y en la optimización de procesos productivos.

La integración sinérgica de estos datos con sistemas avanzados de gestión y análisis permite una visión panorámica del ecosistema industrial. Al correlacionar mediciones de consistencia con métricas operativas clave, se obtiene una comprensión profunda de la interacción entre diferentes variables del proceso. Esta capacidad analítica multidimensional facilita decisiones estratégicas, respaldadas por datos, que conducen a una optimización integral de la cadena productiva.

La modularidad y adaptabilidad del módulo mejorado, fundamentado en tecnologías vanguardistas como Raspberry Pi y plataformas en la nube, garantizan su evolución y adaptabilidad a las dinámicas cambiantes de la industria. Esta flexibilidad inherente asegura que el módulo se mantenga a la vanguardia, respondiendo ágilmente a los desafíos emergentes del sector.

En esencia, la mejora propuesta en el módulo representa un salto cuántico en la forma en que la industria aborda el mantenimiento predictivo. Al fusionar la precisión del análisis de datos con la proactividad del mantenimiento predictivo, se establece un nuevo paradigma para una operación industrial más resiliente, eficiente y orientada al futuro.

Conclusión

El trabajo realizado se centró en resolver una problemática en la industria de la celulosa, el poder modernizar el proceso de calibración y monitoreo de los sensores de consistencia de esta materia prima. Este problema es crítico debido a la relevancia que tienen estos equipos en poder garantizar la calidad de la celulosa a través de mediciones del porcentaje de consistencia de esta misma.

Esto permitió mejorar la eficiencia de este proceso crítico para la producción industrial de la celulosa al modernizar un proceso que requería la presencia in situ de un reducido equipo especializado en esta mantención. Lo que permitió reducir costos y tiempos de inactividad que se asocian a las intervenciones tradicionales

Al implementar un módulo de calibración remota se logra operar en tiempo real desde cualquier ubicación gracias a la microcomputadora que soluciona la necesidad de desplazar a los especialistas de TAI Chile a la planta industrial que requiera de su servicio y poder reducir costos y optimizar tiempos al superar la necesidad de un técnico presencial del método convencional que se utiliza para realizar el proceso de calibración de los sensores.

Las pruebas que se realizaron en la planta de CMPC Maule permitieron validar la funcionalidad del módulo, lo que genera un impacto positivo que se alinean con el objetivo de las grandes empresas de mejorar sus procesos adaptándose a la industria 4.0.

Este módulo mejora un proceso productivo, pero además tiene el potencial de escalar sus funcionalidades al incorporar diversas herramientas para realizar análisis de datos avanzados y convertirse en una solución a la falta de historización de estas métricas relevantes que al ser analizadas entregan información relevante para predecir futuras variaciones.

Este módulo logro un avance significativo hacia la digitalización y la optimización de un proceso industrial critico en la producción de la celulosa que al utilizar tecnologías modernas permitió modernizar la eficiencia y la calidad de este mantenimiento y permite sentar las bases para soluciones similares en otras áreas de la industria fortaleciendo el camino hacia la transformación digital de las industrias.

Referencias bibliográficas

Bravo Montenegro, D. &. (2022). *Bravo MontenComparación entre el aprendizaje presencial y remoto para la enseñanza de sistemas de control automático*. Obtenido de Academia y virtualidad: <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/ravi/article/view/5733>

BTG. (2014). *About BTG*. Obtenido de BTG: <https://www.btg.com/about/>

BTG. (2015). *BTG Eclepens Certificates: ISO 45001 & ISO 9001 2026*. Obtenido de BTG: www.btg.com

Castro, S. M. (2016). *Supervisión y Control Industrial a través de Teléfonos Inteligentes usando un Computador de Placa Única Raspberry Pi*. Obtenido de <https://www.semanticscholar.org/reader/59b93ad98f3e34a31a0ba44b8fd2b5c059ab4c1c>

CMPC. (2012). *CMPC*. Obtenido de <https://www.cmpc.com/>

Collahuazo, J. &. (2017). *Diseño e implementación de prototipo para control de Raspberry PI mediante mensajes GSM en aplicaciones de seguridad*. Obtenido de <https://www.semanticscholar.org/paper/Dise%C3%B1o-e-implementaci%C3%B3n-de-prototipo-para-control-CollahuazoD%C3%ADaz/dbf163ca943e616726392a40e73d81f1a6d25b0b>

Duncan, R. &. (2019). *Journal of Computer Virology and Hacking Techniques*. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s11416-018-0319-9>

Espin, R. J. (2022). *GEEKS DECC-REPORTS*. Obtenido de <https://doi.org/10.24133/gdr.v7i1.2579>

Harriger, A. &. (2020). *2019 ASEE Annual Conference & Exposition Proceedings*. Obtenido de <https://doi.org/10.18260/1-2--32299>

I.D, T., Madrigal, M., A.F, T., & Guzman, L. (2020). *BASES DE LA IMPLEMENTACIÓN DE INTELIGENCIA APLICADAS AL DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL SOFTWARE*. Obtenido de https://pdfs.semanticscholar.org/1e29/9db7e02f09b201728b21e33014dd9da4c12b.pdf?_

gl=1*1j2mkt0*_ga*ODU4NzI1MDk4LjE2OTU4MTE0NDc.*_ga_H7P4ZT52H5*MTY5NTgxMTQ0Ny4xLjEuMTY5NTgxMTYwNS4yNS4wLjA.

Radicelli García, C. D. (2017). *Universitat Politecnica de Valencia*. Obtenido de <https://doi.org/10.4995/thesis/10251/80288>

TAI Chile. (2014). *TAI Chile*. Obtenido de www.taichile.com

TLM. (2018). *Tradelinemachinery*. Obtenido de https://www.tradelinemachinery.com/media/products/51044%20UserManual_CPM_M2066_12_English_20200615.pdf

Velasquez, S. &. (2013). *MONITOREO DE VARIABLES ANALOGICAS USANDO RASPBERRY PI*. Obtenido de <http://www.scielo.org.ve/pdf/uct/v17n69/art02.pdf>