

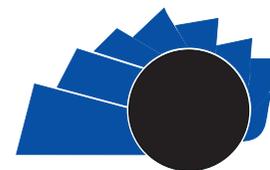


UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Visión Electrónica

Más que un estado sólido

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele>



Visión Electrónica

VISIÓN DE CASO

Laboratorios remotos: estudio de caso con una planta térmica didáctica

Remote laboratories: case study with a didactic thermal plant

Jhon Alejandro Londoño Alzate¹, Aldemar Fonseca Velásquez², Eduardo Alberto Delgadillo³

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Enviado: 30/07/2018

Recibido: 21/08/2018

Aceptado: 07/09/2018

Palabras clave:

Control

Instrumentación

IoT

Laboratorios remotos

Planta térmica

Supervisión

RESUMEN

En este documento se presentan los resultados del proyecto de investigación cuyo objetivo fue analizar, diseñar, implementar y verificar un laboratorio remoto a partir de una planta térmica instalada en una sala de investigación de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Por lo anterior, se obtiene un laboratorio implementable en programas de enseñanza de la ingeniería -o entrenamiento de personal calificado- para realizar prácticas de control, instrumentación, y automatización con plantas reales, en ausencia de recursos y personal suficientes. Se ilustra la superación de retos tecnológicos propios de un desarrollo hardware-software-web tales como: selección de las variables de la planta, acciones remotas, plataforma de hardware y software sujetas a requerimientos técnicos, disponibilidad del servidor web, interfaz amigable para usuarios remotos, así como estimación de tiempos de respuesta. Esta propuesta establece una metodología de aprovechamiento de los avances en tecnologías como IoT (*Internet of Things*), ofreciendo alternativas técnicas que valen la pena asumir en futuras implementaciones.

Open access



Keywords:

Control

Instrumentation

IoT

Remote laboratories

Thermal plant

Monitoring

ABSTRACT

This paper presents the results of research project whose objective was to analyze, design, implement and verify a remote laboratory from a didactic thermal plant installed in the Technological Faculty of the Distrital Francisco José de Caldas University. During the execution of this project, several technical challenges of a hardware-software-web development were presented, such as: the selection of plant variables to be uploaded, which actions that could be performed remotely, what hardware and software platform would respond to the technical requirements, what is the availability of the web server, what is the best user-friendly interface to a remote user and how to have low response times. The justification of a remote laboratory can be seen in the need that is in engineering teaching programs -or training of qualified personnel- to practice control, instrumentation, automation with real plants when there is trouble with the availability of resources and staff. For this, it is proposed achieve this taking advantage of the advances in technologies like IoT (Internet of Things) and offer alternatives that are worth studying.

¹ Tecnólogo Electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: alejometal1@hotmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4117-1696>

² Ingeniero Electrónico Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. MsC Ingeniería Biomédica Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Profesor Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Grupo de investigación INTEGRA. Correo electrónico: afonseca@udistrital.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7904-4676>

³ Ingeniero Electrónico Universidad Santo Tomás, Colombia. MsC Ingeniería Electrónica, Universidad de los Andes, Colombia. Profesor Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Grupo de investigación INTEGRA. Correo electrónico: eadelgadillo@udistrital.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5719-7874>

1. Introducción

De acuerdo con lo que plantea Tawfik y otros en su artículo: “*Defining the Critical Factors in the Architectural Design of Remote Laboratories*”, la justificación de un laboratorio remoto se enmarca en la necesidad que se tiene, en programas de enseñanza de la ingeniería [1] o entrenamiento de personal calificado, de realizar prácticas de control, instrumentación, y automatización con plantas reales cuando no se tiene la disponibilidad de recursos y personal suficientes. A lo anterior se suma que en la última década se ha experimentado un significativo incremento en el diseño y experimentación con laboratorios remotos, [2]. Es decir, los laboratorios remotos rompen las barreras de tiempo y lugar, aportando a la enseñanza de la ingeniería en todos los campos. Y no es sólo una tendencia en las Universidades sino que el sector productivo prevé importantes ventajas para los procesos de capacitación de su personal; por ejemplo, los laboratorios remotos ofrecen una alternativa para el aprendizaje en temas de diseño y experimentación en control, supervisión de procesos y manejo de alarmas.

Un laboratorio remoto, en esencia, es un desarrollo tecnológico que tiene tres componentes básicos: un hardware, un software y una plataforma web, y cuyo objetivo principal es permitirle a los usuarios realizar prácticas como si estuviera en las mismas instalaciones del laboratorio físico. Desde esta perspectiva, es preciso hacer la diferencia con los laboratorios virtuales en los cuales el escenario de práctica es simulado mediante herramientas informáticas. En [3], [4], se hace una revisión de cómo los laboratorios virtuales han evolucionado y aprovechado los avances de las TIC transformándose en laboratorios remotos donde los estudiantes utilizan los recursos de un laboratorio físico real a través de una red local o la internet.

En el anterior sentido, un concepto que viene a jugar un rol importante en el desarrollo de alternativas tecnológicas para los laboratorios remotos es lo que se denomina la tecnología del internet de las cosas (IoT) [5], ya que se parte de sensores, actuadores, y controladores que generan datos autónomamente, alojándose en la nube. En el contexto de IoT vale la pena hacer alusión al concepto original que Kevin Ashton plantea en el año 1999 en *Procter & Gamble (P&G)*. Ashton manifiesta que los sistemas informáticos y la Internet, como se venían desarrollando, eran totalmente dependientes (poco autónomos) de los seres humanos para ser

alimentados con información nueva. Y adiciona que textos, fotografías, videos, códigos de barras son tomados por humanos, subidos y compartidos en Internet, por lo que en últimas se convierten en nodos vivos de Internet. Acuña así el concepto de *internet de las cosas* para referirse a cómo la tecnología tendría que evolucionar a un estadio donde son las cosas quienes producen los datos en internet, [6].

De otro lado, en [7] se presenta una revisión bibliográfica acerca de los laboratorios remotos y su aplicación en el aprendizaje de las ciencias en ambientes diseñados a partir de aplicaciones específicas, como HistCite y CiteSpace. En éstas se encuentra evidencia acerca de que los enfoques de enseñanza y aprendizaje basados en laboratorios remotos permiten mejorar la comprensión de la ciencia y las actitudes hacia este nuevo modo de aprendizaje para estudiantes de todos los niveles. En [8], en tanto, se plantea que el desarrollo e implementación de plataformas software en la nube para el manejo de laboratorios remotos permite su aplicación con un alto nivel de abstracción y virtualización; bajo esta formulación se puede compartir laboratorios remotos a nivel mundial entre instituciones, de manera organizada. Y en [9], finalmente, se presenta un estudio para evaluar laboratorios remotos en la enseñanza de la electrónica, específicamente con la plataforma UNED-COMA, concluyéndose que en un entorno masivo y difícil se encuentran resultados satisfactorios de uso tanto en temas de ingeniería como en los denominados MOOC (*Massive Online Open Course*). Además, las prácticas diseñadas se volvieron estimulantes, brindando a los usuarios la clara sensación de trabajar con un laboratorio real.

Desde el anterior orden de ideas, el presente documento se enmarca en un proyecto de investigación cuyo objetivo fue el análisis, diseño, verificación e implementación de un laboratorio remoto basado en una planta térmica didáctica. Para cumplir el objetivo, y así se establece la estructura del artículo, se desarrolló e implementó una plataforma tecnológica con dos grandes componentes: en primer lugar, una planta térmica real con un intercambiador de calor, un tanque de almacenamiento y calentamiento del producto, controladores, sensores, actuadores y todos los elementos físicos que requiere éste tipo de plantas. En segundo lugar, una plataforma de información web bajo código HTML con el propósito de otorgar a usuarios remotos la posibilidad de ejercer acciones de supervisión y control de la planta física que se

encuentra instalada en la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

2. Métodos y materiales

Para la ejecución del proyecto se utilizó una metodología *Top – Down*, conocida en proyectos I+D, donde se plantea el problema globalmente, luego se divide en fases o subsistemas y finalmente se abordan los requerimientos particulares de los componentes. En este mismo sentido, lo referido en [10] acerca del concepto de investigación aplicada cobra aquí significado: “*La investigación aplicada se orienta hacia la obtención de conocimiento o comprensión para determinar los medios por los cuales una necesidad específica, reconocida puede ser satisfecha.*”. Es decir, la metodología que se aborda en este proyecto reconoce, desde la perspectiva de la investigación aplicada, que hay una necesidad de obtención de conocimiento o comprensión para determinar rutas o alternativas tecnológicas que respondan a los requerimientos de un laboratorio remoto, particularmente con una planta de proceso como es una planta térmica.

En ese orden de ideas, el proyecto se desarrolló teniendo en cuenta tres componentes: el componente hardware que es la planta térmica y los módulos de conectividad; el software tanto en los sistemas digitales en la planta como en el computador local de supervisión; y por último el soporte tecnológico en la web. Entonces, primero se aborda la estructura de la

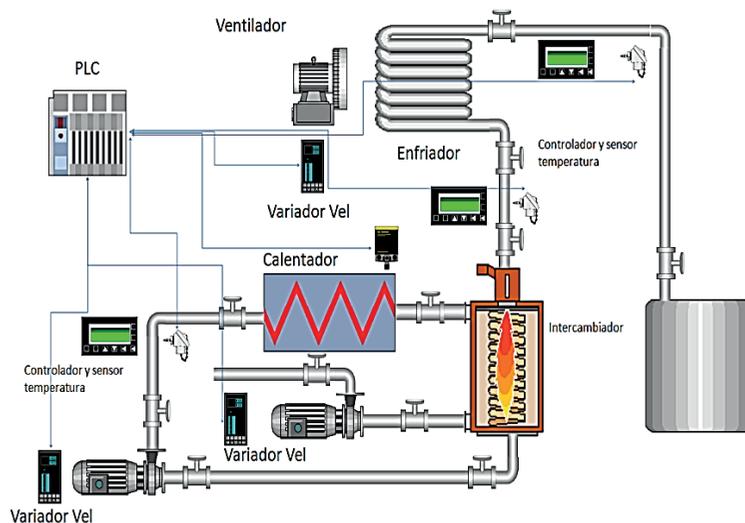
planta térmica para luego a partir de ahí establecer los requerimientos del laboratorio remoto deseado.

2.1. Planta Térmica

La planta térmica que se diseñó e implementó tiene como sustento teórico las plantas de pasteurización – donde se realiza un calentamiento rápido del producto y luego un enfriamiento lento del mismo, [11]. En éste tipo de plantas se tienen dos flujos principales: el flujo de producto y el flujo de servicio; el flujo de producto es llevado a un intercambiador de calor donde por convección con el fluido de servicio sufre el respectivo proceso térmico mencionado. El principal objetivo de la planta térmica es el intercambio de calor, para lo cual se requiere el control de temperatura del lazo de servicio. Este proceso es supervisado por una aplicación en LabView que se conecta al PLC de la planta por medio de una interfaz estándar RS232.

Una estructura de la planta térmica que se desarrolló se muestra en la Figura 1; está conformada por dos circuitos hidráulicos para la transferencia de calor basados en un intercambiador de calor del tipo carcasa-serpentin. El fluido caliente (agua), obtenido a partir de un calentador eléctrico el cual dispone de su propio control de temperatura, es impulsado a través del intercambiador empleando una bomba centrífuga trifásica con su respectivo variador de velocidad, lo que permite realizar un lazo de control de flujo al disponer de un transductor de caudal del

Figura 1. Estructura general de la planta térmica



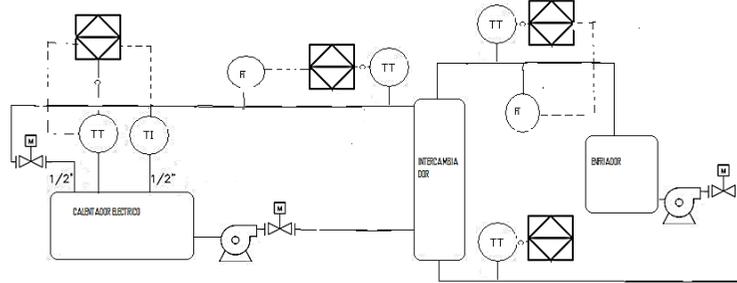
Fuente: elaboración propia.

tipo paletas rotativas y salida 4-20mA, con un rango de 0 a 15 gpm.

El diagrama de proceso e instrumentación se presenta en la Figura 2, según la norma ISA-S5.1.

En la figura se presenta como dispositivo de control un PLC, y la instrumentación para temperatura y caudal con salida estándar 4 a 20mA. El PLC se comunica con un computador por bus de campo del tipo MODBUS.

Figura 2. Diagrama de proceso (P&ID) según norma ISA. [12]



Como el rango de temperaturas que se necesitan supervisar y controlar está entre 0 y 100°C, entonces se seleccionaron como sensores **termocuplas** PT100. Este sensor tiene la característica que su resistencia eléctrica aumenta con el aumento de la temperatura. El incremento de la resistencia de la PT100 no es lineal pero si creciente y existen tablas que suministra el fabricante en la información técnica del sensor para determinar la temperatura que corresponde ante determinada medición de resistencia, [11], [13]. Normalmente las sondas PT100 industriales se fabrican encapsuladas en la misma forma que los termopares, es decir dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material (vainas). En un extremo está el elemento sensible (Sensor RTD) y en el otro está el terminal eléctrico de los cables protegido dentro de una caja redonda de aluminio (cabezal), Figura 3.

Figura 3. Termocupla PT100.



Fuente: elaboración propia.

Para impulsar los fluidos en los dos circuitos se tienen **bombas hidráulicas**. Una bomba hidráulica es una fuente de energía hidráulica que aumenta la presión y/o el flujo. En el proyecto se utilizó una bomba de engranaje interno, Figura 4, la cual tiene un espacio mínimo entre los dientes de engranaje de la parte superior y la parte del fondo de la caja entre los dientes que se intercalan. El fluido entra y es atrapado entre los dientes de engranajes llevándolo hacia el lado de alta presión donde es comprimido y enviado hacia afuera a través del espacio entre los engranajes, [14], [12].

Figura 4. Bomba de engranaje interno.



Fuente: elaboración propia.

El sistema cuenta con otros dispositivos como la resistencia de calefacción, dos tanques de almacenamiento de agua, un intercambiador

de calor, una fuente de alimentación de 24V, un variador de velocidad SEW, un tablero de control, Figura 5, y un enfriador radiador, [15].

Figura 5. Fotografía del Tablero de control.



Fuente: elaboración propia.

2.2. Requerimientos del Laboratorio Remoto

La base de un laboratorio remoto es la infraestructura física que permita realizar las prácticas remotamente. En éste caso la base es la planta térmica a la cual se desea realizar acciones de control y supervisión desde un sitio remoto vía web. Para lograrlo, se plantean en primera instancia, algunas interrogantes orientadores que permitan dimensionar los requerimientos:

- ¿Cuáles son las variables que se desean supervisar y/o controlar remotamente?
- ¿Cuáles acciones sobre la planta se desean ejercer remotamente?
- ¿Los sensores, actuadores y controles que se encuentran instalados en la planta responden a requerimientos remotos?
- ¿Qué potencialidad permite el sistema de controladores, incluyendo el PLC para realizar acciones de control o supervisión remotos?

Entonces, una primera aproximación al planteamiento y solución del problema fue identificar cuáles son los sensores y controles que actualmente dispone la planta y que se podrían manejar desde un sitio remoto a través de internet. A continuación se relaciona una lista de éstos elementos:

- Sensores de temperatura T0, T1, T2, T3, T4.
- Control remoto de encendido y apagado de la planta.
- Control de estado manual y automático de la planta.
- Control remoto de la resistencia de calefacción.
- Control remoto de la bomba de servicio y producto.
- Control automático por medio del *set point* del lazo de control de temperatura.

Enseguida se propuso los requerimientos técnicos generales que debe tener el sistema de laboratorio remoto teniendo en cuenta la instalación física disponible, escritos desde la perspectiva del usuario:

- El sistema debe visualizar mediante una interfaz gráfica en el sitio remoto, mediante barras de valores y graficas de comparación, el valor actual de las temperaturas T0 y T3 respecto al valor de referencia (*set point*). Para lograrlo el diseño del sitio se realizó utilizando los servicios de un servidor IoT, que brinda soporte web directo al microcontrolador IoT.
- El sistema debe contar con una interfaz gráfica local, análoga a la interfaz gráfica remota donde se pueda corroborar la interacción entre la interfaz remota y la planta física. Entre otros aspectos se debe indicar si las órdenes son recibidas correctamente por la planta o si por el contrario hay pérdida de datos o comandos. Para esto se implementó el módulo de recepción mediante la tecnología *IoT particle photon* que provee esta funcionalidad.
- Se necesita un sistema de supervisión en donde se puedan activar y desactivar los distintos actuadores de la planta remotamente.
- El sistema necesita acceder a un servicio de conexión a internet. Para lo cual, se deja la posibilidad de establecer conexión a una red *WiFi* cercana o por medio de un celular que habilite el uso del acceso a internet.
- Finalmente, se propuso el requerimiento de contar con señal de video en tiempo real en el sitio remoto para que el usuario observe lo

que sucede tanto en la planta física como en la interfaz local. Para lo cual se instaló una cámara que transmite mediante streaming, y video de baja resolución mostrando el proceso de control y el estado de la planta.

2.3. Diseño del sistema de Laboratorio Remoto

Una vez establecidos los requerimientos que se mencionaron anteriormente, se procede con el diseño e implementación general del sistema de Laboratorio Remoto. En este sentido, fue necesario iniciar con el rediseño de los programas de control y programación del PLC y de la interfaz gráfica local (en LabView) para incluir la funcionalidad de intercambio con el sitio remoto. La estructura general del sistema de Laboratorio Remoto como se planteó, se muestra en la Figura 6, donde se deben identificar los tres grandes componentes:

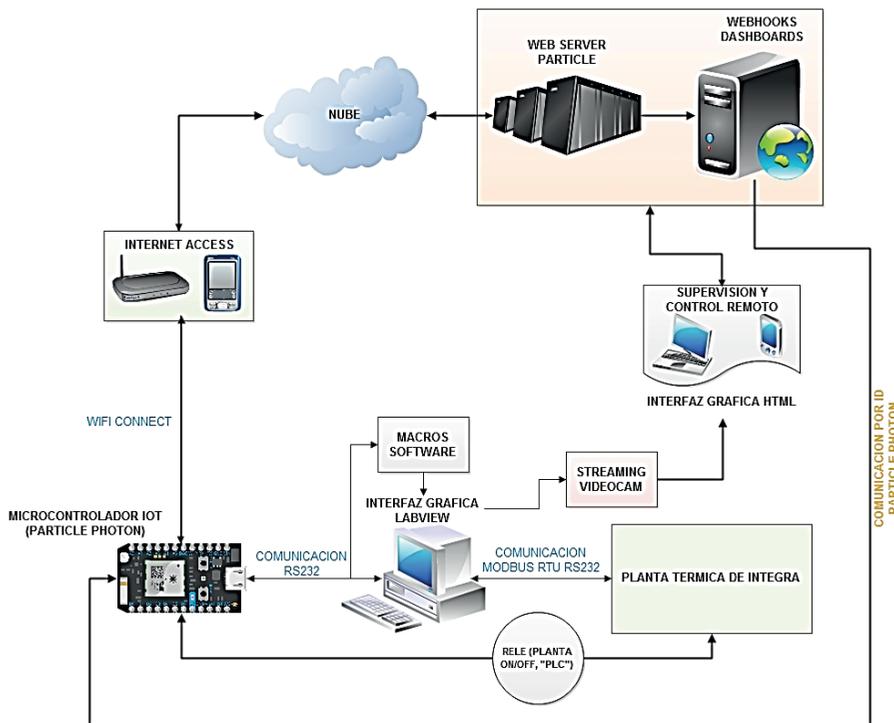
- El componente de hardware: compuesto por la instalación física de la planta, el computador local, el relé de encendido general de la planta y la cámara para el video *streaming*.

- El componente de software: compuesto por la programación en el PLC, en la interfaz gráfica local y en la interfaz remota.
- El componente de soporte web: compuesto por el microcontrolador IoT *particle photon*, el acceso a internet y el servidor en internet conformado por el *Web Server Particle*, el *Webhooks Dashboards* y la interfaz *html*. El puente entre el mundo local y el mundo web lo realiza el microcontrolador *Particle Photon*, cuyo soporte IoT permite conectarse por *WiFi* a la red internet y acceder al servicio de host y utilidades del *Web Server Particle*.

2.3.1. Programación de la Interfaz Gráfica Local

La interfaz gráfica local tiene dos propósitos: en primer lugar, constituye el sistema de supervisión y control general de la planta junto con el PLC; en segundo lugar, debe trabajar con el microcontrolador IoT *particle photon* para hacer de puente entre el sistema local y el sistema remoto. Esta interfaz gráfica, se diseñó en el ambiente LabView y muestra

Figura 6. Estructura general de red del laboratorio remoto



Fuente: elaboración propia.

todos las variables controlables: temperaturas, caudal, presión, nivel del agua en el tanque de calefacción, velocidad del variador y el control PID entre otros Figura 7. Además la interfaz permite modificar las constantes PID del sistema de control de temperatura del flujo de servicio.

Algunos aspectos importantes de la programación de la interfaz gráfica local en LabView son:

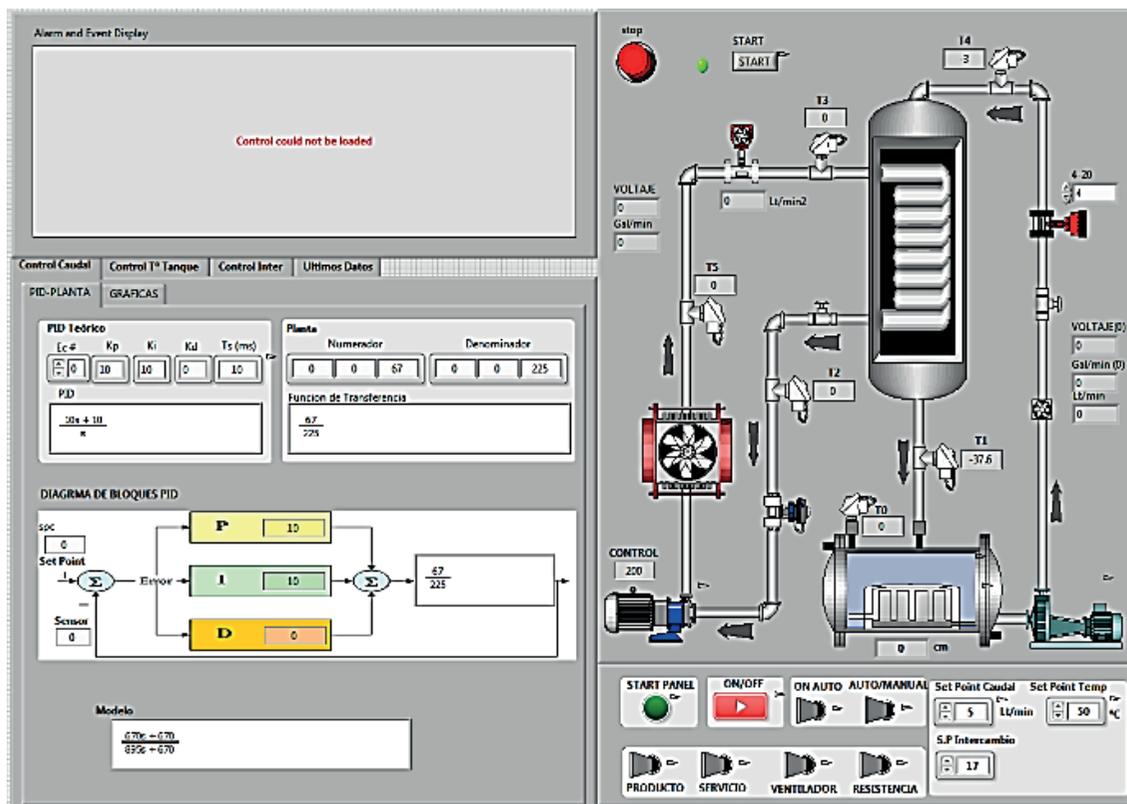
- Programación del puerto serie mediante el componente *VISA RS232*: por medio de esta interfaz de comunicaciones se conectó el microcontrolador IoT con el computador local.
- Exportación de las variables: Con ayuda de la herramienta *format into string* se agruparon las variables en una cadena de caracteres tipo *string* para enviar datos desde el computador al microcontrolador IoT (y de ahí al sitio remoto).
- Lectura de los datos que vienen desde microcontrolador IoT (parámetros y comandos): Se podría decir que este es el punto clave del

proyecto, puesto que el microcontrolador IoT al recibir una orden desde internet, debe codificar esta orden en un carácter ASCII (números) que se envía por el puerto serie al computador local. En el computador local, la interfaz gráfica se encarga de reconocerlo y dependiendo de la configuración de la herramienta *in range and coerce* reconoce este número y se envía a la herramienta *match true/false string*. A partir de este punto los comandos están bajo control de una combinación booleana lógica en la interfaz gráfica. Mediante esta lógica se tienen el encendido de la planta, prender y apagar dos actuadores de la planta al mismo tiempo. Tiene además indicadores booleanos que muestran al usuario si la señal de internet llegó o si por el contrario hubo pérdida de datos.

2.3.2. Programación del microcontrolador IoT Particle Photon

Como ya se mencionó el puente de comunicaciones entre el mundo local de la planta térmica con el mundo remoto en la web es el microcontrolador

Figura 7. Interfaz gráfica local (LabView)



Fuente: elaboración propia.

IoT *Particle Photon*. El aspecto favorable de este microcontrolador es que no se requiere crear un dominio o host en internet para transmitir y mostrar la información transmitida, además de no tener que configurar puertos de conexión, tanto de salida como de entrada en el modem que provee su conexión. Es decir, el soporte tecnológico que tiene éste microcontrolador incluye todas las capacidades para alojar y mostrar datos de las variables en una interfaz remota. Estas capacidades las provee el mismo fabricante del microcontrolador mediante las herramientas de manejo de páginas secundarias llamadas *webhooks dashboards*, y cuya finalidad es mostrar de una manera amigable al usuario los datos que recibe su microcontrolador en tiempo real. En síntesis, el microcontrolador *Particle Photon*, junto con el *Web Server Particle* y las páginas secundarias *Webhooks Dashboards* configuran una tecnología IoT.

El microcontrolador *Particle Photon* se programa bajo el lenguaje C y C++, y se cuenta con la posibilidad de integrar librerías ya hechas para su funcionalidad, [16]. En el código del micro se programaron dos funcionalidades principales: la primera leer el puerto serie, y la segunda mandar un número carácter ASCII. En primer lugar, La lectura del puerto serie tiene como objetivo recibir los datos que se envían desde el LabView, estos datos corresponden a cinco sensores de temperaturas (termocuplas) puestos en diferentes posiciones de la planta térmica para enseguida enviarlos al sitio remoto, teniendo cuidado

con los tiempos de refresco de página. En segundo lugar, desde el sitio remoto se reciben datos en el microcontrolador que deben ser enviados a la interfaz gráfica local en LabView para que se ejecuten las órdenes respectivas. La aplicación web que se creó tiene diferentes botones que al seccionarse envían una palabra que es interpretada en el microcontrolador *Particle Photon*. Este microcontrolador interpreta la palabra y la convierte en un carácter que se envía a la interfaz gráfica en el computador local. Cada botón tiene una palabra, al igual que todas sus combinaciones posibles.

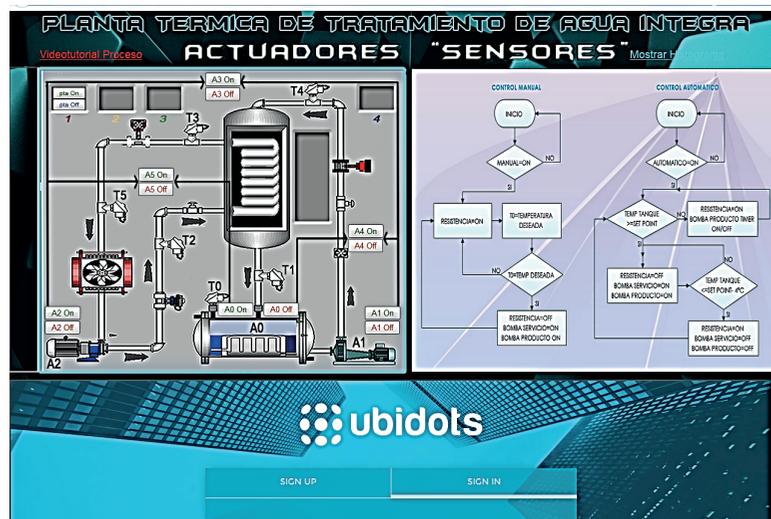
2.3.3. Programación de la interfaz gráfica remota

El código de ésta interfaz remota se escribió en block de notas, es decir, no se necesitó ningún programa de edición de código HTML o diseño web. En este código se incluyen librerías o comandos de *javascript* que ayudan a visualizar de manera gráfica en el sitio remoto el funcionamiento de la planta y permite la supervisión en tiempo real.

Es importante también contar con un nivel mínimo de seguridad, y por tanto la página se diseñó de tal manera que se requiere una autenticación para poder acceder a través de ella al control remoto de la planta.

A nivel de la funcionalidad de la interfaz remota, como se muestra en la Figura 8, se incluyeron entre otros las siguientes posibilidades:

Figura 8. Interfaz gráfica remota, diagramas de flujo



Fuente: elaboración propia.

- Distintos modos de visualizar las variables más importantes como son T3 y T1
- Configuración del valor de referencia (*set point*)
- Contar con un video tutorial incluido de su manejo
- Programas de control de la temperatura en modo manual/automático, que el usuario puede seguir para realizar prácticas de laboratorio remoto
- Permite un control total, amigable y dinámico de las temperaturas a supervisar y los actuadores a controlar.

2.3.4. Programación de macros

Debido a inconvenientes que se presentaron en la interacción entre las órdenes desde el sitio remoto, la interfaz local en LabView y el PLC fue necesario mejorar la funcionalidad de la interfaz gráfica con algunos macros que automatizan una secuencia de *clicks* al momento de enviar una orden desde el sitio remoto. El principal inconveniente que se presentó fue que al instalar un relé para el prendido y apagado remoto de la planta, y más explícitamente del PLC, se causaba una desconexión al computador local que controla la planta.

Los programas macros suprimen este problema ya que interactúan directamente con la interfaz de Windows y no están sujetos a LabView, entonces cuando reconocen la orden desde el puerto serial de un carácter ASCII lo transforman en una orden de interfaz o seguimiento de puntero y generan una secuencia de *clicks* previamente grabada con el fin de frenar el programa Labview justo antes de apagar el PLC remotamente. Todo esto ocurre solamente al activar la orden de apagado de la planta desde el sitio remoto. Así mismo, con la orden de prendido desde la web, se prende el PLC y activa la macro de *Start* de LabView.

2.3.5. Implementación del relé de encendido y apagado remoto, e implementación del video streaming

Como se ha mencionado éste era uno de los objetivos claves, el encendido y apagado de la planta remotamente. Para lo cual se planteó hacer un encendido de toda la planta, con bombas, fuentes y variadores desde un solo botón, pero esto requería un contactor del cual no se disponía en la estructura

original de la planta. Entonces, a cambio se decidió manejar un relé de activación de 5V @ 220AC/10A cuyo propósito es el encendido y apagado del PLC, mediante la interrupción de su voltaje de alimentación.

Como parte de la funcionalidad aportada al sitio remoto se propuso ayudar al usuario en la supervisión del proceso, mediante una cámara instalada frente al computador. A partir de la cámara se creó una rutina de video llamada para poder supervisar y verificar si efectivamente las órdenes y datos concuerdan con los que se están observando remotamente, además de verificar si la orden llegó a la planta o si por algún error se perdió por alguna desconexión o fallo.

3. Resultados

Para evaluar los resultados del proyecto se tomó como modelo lo planteado en el trabajo de Tawfik y otros en [2], donde se propone medir o verificar los resultados de un desarrollo de laboratorio remoto en aspectos como: el desempeño en tiempo real, la flexibilidad de su manipulación, la reutilización de los recursos, el aprovechamiento de equipamiento compartido y el soporte de aplicaciones en condiciones límite. Aunque esta conceptualización es un poco subjetiva, aun así permite generar criterios de juicio para evaluar el desempeño general de un sistema de laboratorio remoto. Es decir, se puede decir que aunque actualmente aún no existe una métrica estándar para evaluar el desempeño o los resultados de un sistema de laboratorio remoto, hay avances en temas particulares, por ejemplo en el software, tal como se menciona en [17], [18], [19], donde se plantean criterios como seguridad y calidad de servicio (QoS), tecnologías Web Cliente y conectividad.

Tomando como base este contexto de evaluación se puede verificar y calificar el sistema de Laboratorio Remoto para una Planta Térmica Didáctica desarrollado en términos de sus componentes y funcionalidad.

3.1. En cuanto al hardware: equipamiento de laboratorio físico

Las características resultantes del equipamiento físico del laboratorio remoto, se pueden sintetizar en la Tabla 1

3.2. En cuanto a la red y las comunicaciones

En este aspecto se evalúa el desempeño desde dos perspectivas: la red (internet) y las comunicaciones

Tabla 1. Sistema físico de la planta térmica ubicada en el grupo INTEGRA.

Componente de hardware o funcionalidad	Indicadores
Sistema de adquisición de datos	El sistema desarrollado cuenta con un sistema DAQ que permite la lectura de más de 20 variables análogas y digitales. En éste caso la mayoría de los sensores tanto de caudal como de temperatura tienen salida análoga 4 a 20 mA y se conectan al PLC. En éste sentido la instrumentación no es autónoma, lo cual otorga mayor eficiencia y confiabilidad al sistema.
Modularidad de los componentes	En éste caso, se cuenta con un gabinete de controles estándar con slots de 19". El diseño de la planta siguió especificaciones estándares industriales tanto a nivel mecánico como a nivel eléctrico. La comunicación con el computador de supervisión se realiza por medio del estándar MODBUS. Estos elementos de modularidad traen ventajas de reducción de espacios y costos, y aumentan la flexibilidad.

Fuente: elaboración propia.

locales en aspectos como tiempos de retardo, ancho de banda, tasa de errores, disponibilidad. En éstos aspectos se hicieron pruebas generando los siguientes resultados (Tabla 2)

3.3. En cuanto a funcionalidad

En éste aparte se tienen en cuenta las posibilidades que el sistema otorga al usuario para

visualizar, operar, realizar cambios en el sistema o para experimentar con nuevas prácticas como se sintetiza en la tabla 3.

La Figura 9 muestra una vista típica de la interfaz gráfica remota donde se observa una vista general de la planta térmica con los respectivos rótulos de las variables de tal manera que cuando se pica sobre alguno de ellos la interfaz mostrará el estado de la

Tabla 2. Indicadores de desempeño de las comunicaciones

Componente de red y las comunicaciones	Indicadores
Comunicaciones locales	Los sensores se comunican con el PLC por medio de lazos de corriente 4 a 20mA, lo que significa muy bajos tiempos de retardo. Sin embargo el PLC muestrea y digitaliza dichas señales a una tasa máxima de 1000 sps. El PLC se comunica con el computador de supervisión por medio de un bus MODBUS a una velocidad de 9600 bps.
Comunicaciones de internet	El computador de supervisión se comunica con el microcontrolador <i>Particle Photon</i> por medio de una interfaz serial RS232 a una velocidad de 9600 bps. El microcontrolador <i>Particle Photon</i> se comunica con el proveedor de internet por medio del protocolo <i>WiFi</i> (TCP/IP) a tasas mayores a 1 Mbps.
Desempeño general	Se realizaron mediciones de desempeño general, es decir desde el origen de los datos hasta la disponibilidad de estos en la interfaz remota y se obtuvieron algunos indicadores como: Latencia general: entre 5 y 10 segundos Tasa de errores: 1% aprox. Ancho de banda: 500 Hz cuando sólo se transmite una variable. Adicionalmente el <i>video-streaming</i> se logró transmitir simultáneamente junto con las variables de control con una resolución de 320x160 a 30 cuadros por segundo.

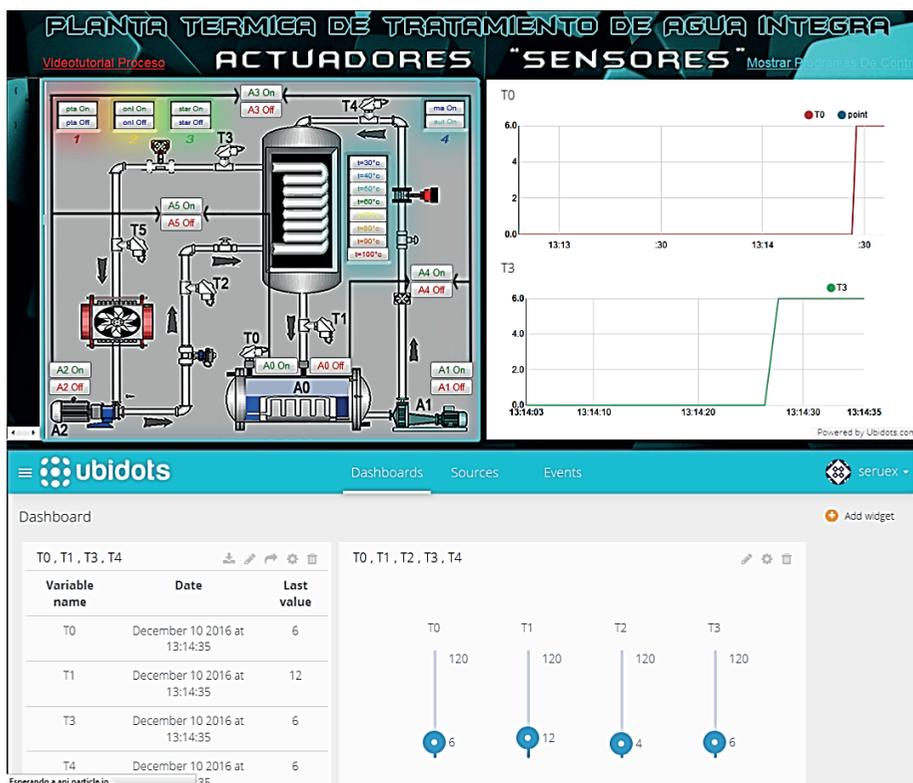
Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Indicadores de funcionalidad del laboratorio remoto

Elemento de funcionalidad	Indicadores
Controlador configurable	El sistema implementa dos lazos de control: el control de temperatura y el control de flujo. En juntos casos se tienen controladores PID cuyas constantes Kp, Kd y Ki pueden ser reconfiguradas remotamente. Se tiene un protocolo para realizar ésta acción sin afectar un proceso que haya sido iniciado previamente. También el usuario tiene la posibilidad de realizar acciones de control manual o dejarlo en control automático. El sistema desarrollado no cuenta con la posibilidad de ensayar otras estrategias de control.
Seguridad contra situaciones críticas.	El sistema desarrollado no cuenta con un sistema formal de vigilancia contra situaciones críticas o mal funcionamiento. Sin embargo, cuenta con niveles básicos de protección contra sobre voltajes o sobre corrientes.
Visualización e interactividad	La interfaz gráfica remota le permite al usuario verificar el estado de las variables de los lazos de control de temperatura o de flujo, con indicaciones tanto numéricas como en histogramas. Desde la vista principal el usuario puede seleccionar variables particulares para observarlas con mayor detalle. También puede seleccionar entre control remoto y manual. Si el sistema es puesto en control manual, la interfaz le ofrece a usuario una serie de botones para realizar acciones directas a la planta térmica como prender o apagar las bombas, prender o apagar el calefactor, etc.

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Vista típica de la interfaz gráfica remota



Fuente: elaboración propia.

variable tanto numérica como gráficamente. También se observan los botones que le otorgan la posibilidad al usuario de realizar acciones manuales sobre la planta. En la parte inferior se observa como la herramienta *Dashboard* permite llevar un registro de las variables, en caso que se requiera hacer un estudio posterior.

Por último, se deja un video demostrativo del funcionamiento del laboratorio remoto en el enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=-YwuzQ933JU&t>. También, se deja el espacio abierto por parte de los autores, para que el lector pueda solicitar por medio de correo electrónico mayores detalles del proyecto.

4. Conclusiones

Los laboratorios remotos pueden ser un buen campo de aplicación de los avances tecnológicos que se rotulan con el nombre de internet de las cosas (IoT). Sin embargo, se deben tomar mayores precauciones de seguridad ya que estamos hablando de tecnologías que conectan cosas del mundo real con

el mundo virtual de la red internet, en este caso una planta térmica didáctica.

El desarrollo de éste tipo de proyectos donde se juntan una tecnología IoT y un sistema electrónico industrial abren muchas alternativas y retos para el mejoramiento de aspectos de la instrumentación y automatización como son la supervisión, el mantenimiento, el control, la fiabilidad y la interactividad al operador.

De la misma forma se resalta en la ejecución de éste proyecto como los programas de control por macros, son programas de alta eficiencia que permiten secuencias de órdenes pregrabadas para que reconozcan órdenes secuenciales y permiten versátiles opciones de optimización o control, además de muchos alcances en un mundo electrónico o sistematizado.

El microcontrolador *Particle Photon* IoT se puede catalogar como un dispositivo con tecnología IoT que responde bien a una fase inicial de desarrollo

de aplicaciones hardware-software-web como las de este proyecto, con otras ventajas frente a otros microcontroladores o tarjetas de desarrollo ya que ofrece el soporte y funcionalidad en la Web.

El proyecto cumplió con las expectativas iniciales en cuanto a soporte en hardware, desempeño de comunicaciones y funcionalidad al usuario. Sin embargo, deja un gran camino abierto para mejorar los indicadores de calidad como sistema de laboratorio remoto y que seguramente serán cada vez más exigentes.

5. Reconocimientos

La ejecución de éste proyecto fue un trabajo en equipo por parte del grupo de investigación INTEGRA que pertenece a la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Se resalta la colaboración de profesores y estudiantes que han venido realizando aportes importantes al conocimiento y desarrollo de tecnologías IoT e IIoT.

También se destaca y se hace un reconocimiento póstumo al profesor Alfredo Chacón García por su gran esfuerzo dedicado al desarrollo inicial de la planta térmica del grupo, así como su tenacidad y constancia para motivar la realización de este tipo de proyectos con sus estudiantes.

Referencias

- [1] P. Lorandi, G. Hermida, J. Hernández, and E. Guevara, "Los Laboratorios Virtuales y Laboratorios Remotos en la Enseñanza de la Ingeniería," *Rev. Int. Educ. en Ing.*, vol. 4, pp. 24–30, 2011.
- [2] M. Tawfik *et al.*, "Defining the Critical Factors in the Architectural Design of Remote Laboratories," *IEEE Rev. Iberoamericana Technol. del Aprendiz.*, vol. 10, no. 4, pp. 269–279, 2015, <https://doi.org/10.1109/RITA.2015.2486388>
- [3] L. Rosado and J. R. Herreros, "Laboratorios virtuales y remotos en la enseñanza de la Física y materias afines," *Didáctica la Física y sus nuevas Tendencias*, vol. 38, pp. 415–603, 2002.
- [4] S. Marchisio, F. Lerro, and O. Von Pamel, "Empleo de un laboratorio remoto para promover aprendizajes significativos en la enseñanza de los dispositivos electrónicos," *Pixel-Bit. Rev. Medios y Educ.*, n° 38, pp. 129–139, 2011.
- [5] S. Ray, Y. Jin, and A. Raychowdhury, "The Changing Computing Paradigm with Internet of Things: A Tutorial Introduction," *IEEE Des. Test*, vol. 33, n° 2, pp. 76–96, 2016, <https://doi.org/10.1109/MDAT.2016.2526612>
- [6] K. Ashton, "That 'internet of things' thing," *RFiD J.*, vol. 22, n° 7, pp. 97–114, 2009.
- [7] S. W. Tho, Y. Y. Yeung, R. Wei, K. W. Chan, and W. W. So, "A Systematic Review of Remote Laboratory Work in Science Education with the Support of Visualizing its Structure through the HistCite and CiteSpace Software," *Int. J. Sci. Math. Educ.*, vol. 15, n° 7, pp. 1217–1236, 2017, <https://doi.org/10.1007/s10763-016-9740-z>
- [8] M. Tawfik *et al.*, "Middleware solutions for service-oriented remote laboratories: A review," in *Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 2014 IEEE, 2014, pp. 74–82, <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2014.6826071>
- [9] F. G. Loro, A. Macho, E. Sancristobal, M. R. Artacho, G. Díaz, and M. Castro, "Remote laboratories for electronics and new steps in learning process integration," in *Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2016 13th International Conference on*, 2016, pp. 112–117, <https://doi.org/10.1109/REV.2016.7444449>
- [10] A. Cassanelli, "Proyectos de I + D , aplicación de metodologías de gestión de proyectos," III Congr. Iberoam. Ing. Proy., 2012.
- [11] H. C. Cuno, "Automatización y monitoreo de una planta para pasteurización de leche," Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San agustin de Arequipa, 2015.
- [12] M. Zubicaray, "Bombas: teoría, diseño y aplicaciones," México: Limusa S. A, 2005.
- [13] E. J. A. Rodríguez, J. W. M. Ocampo, and C. A. S. Ortega, "Medición de temperatura: sensores termoelectricos," *Sci. Tech.*, vol. 1, no. 34, 2007.
- [14] K. J. McNaughton, "Bombas: Selección, Uso y Mantenimiento," *Chem. Eng.*, vol. 621, n° 67, p. 379, 1989.

- [15] A. Chacón, “Plataforma Didáctica para el Estudio de Procesos Térmicos en Laboratorio de Instrumentación Industrial.,” Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana, 2013.
- [16] “Particle Datasheets Documentation | Photon datasheet.” [En línea] Disponible en: <https://docs.particle.io/datasheets/photon-datasheet/>
- [17] E. Guimaraes, E. Cardozo, and D. Moraes, “Design and implementation issues for modern remote laboratories,” *IEEE Trans.*, vol. 4, no. 2, pp. 149–161, 2011, <https://doi.org/10.1109/TLT.2010.22>
- [18] J. García-Zubia and P. Orduna, “Addressing software impact in the design of remote laboratories,” *IEEE Trans.*, vol. 56, no. 12, pp. 4757–4767, 2009, <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2026368>
- [19] M. Valls and P. Val, “Usage of DDS data-centric middleware for remote monitoring and control laboratories,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 9, n° 1, pp. 567–574, 2013, <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2211028>