

# Prototipo de Sistema para la Adquisición de Señales de Temperatura en Soldadura Submarina

## Prototype System for the Acquisition of Temperature Signals in Underwater Welding

Luis Felipe Parra-Pacheco<sup>1</sup>, Edinson Alfonso Bastos-Blandón<sup>2</sup>, Lissette Patricia Casadiego-Miranda<sup>3</sup>, Enrique Esteban Niebles-Núñez<sup>4</sup>, Kelvin Beleño-Sáenz<sup>5</sup>, Lina María Leguizamón-Galindo<sup>6</sup>

1: Ingeniero Mecatrónico. Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. Universidad Autónoma del Caribe. Grupo de Investigación - GIIM, Barranquilla – Colombia

2: Especialista Tecnológico en Logística Naval, Maestrante en Logística Integral de la Universidad Autónoma del Caribe Profesional en Administración Marítima, Fluvial y Portuaria. Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación; Armada Nacional. Grupo de Investigación – GLAMS. Escuela Naval de Suboficiales ARC “Barranquilla”. Cartagena – Colombia.

3: Magister en Gestión Logística, Magister en Gestión de la Innovación de las Organizaciones, Maestrante en Administración de la Universidad Autónoma del Caribe. Ingeniero Industrial. Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación; Armada Nacional. Grupo de Investigación – GLAMS. Escuela Naval de Suboficiales ARC “Barranquilla”. Barranquilla – Colombia.

4: Doctor y Magister en Ingeniería Mecánica, Ingeniero Industrial, Licenciado en Ciencias de la Educación especialidad en Matemáticas y Física, Técnico Profesional en Soldadura; Universidad Autónoma del Caribe. Grupo de Investigación – IMTEF, Barranquilla – Colombia.

5: Doctor en Ingeniería Química, Magister en Controles Industriales, Ingeniero Electrónico. Universidad Autónoma del Caribe. Grupo de Investigación – GIIM. Barranquilla – Colombia

6: Ingeniero Metalúrgico. Maestrante en Ingeniería Mecánica de la Universidad Autónoma del Caribe. Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. Sena Colombo Alemán – CNCA. Barranquilla – Colombia

Cite this article as: L. F. Parra-Pacheco, E. A. Bastos-Blandón, L. P. Casadiego-Miranda, E. E. Niebles-Núñez, K. Beleño-Sáenz, L. M. Leguizamón-Galindo “Prototipo de sistema para la adquisición de señales de temperatura en soldadura submarina”, *Prospectiva*, Vol.21, N°2, 2023.

**Recibido: 16/02/2023 / Aceptado: 23/05/2023**

<http://doi.org/10.15665/rp.v21i2.3255>

### RESUMEN

*Teniendo en cuenta la necesidad de determinar la ventana del proceso de soldabilidad, los ciclos y aportes térmicos aplicados en procesos de soldadura subacuática dentro del proyecto “Análisis de soldabilidad submarina en materiales DH36 aplicada en ambientes trópico y polar para apoyo logístico de expediciones científicas de Colombia en la Antártica”, se diseñó un prototipo de un sistema para la adquisición de señales de temperatura por medio de termopares instalados en una placa metálica. Este prototipo a su vez conllevó al diseño en LabVIEW™ de un algoritmo para medir y almacenar las variaciones de temperatura, utilizando como sensores termopares tipo K. La validación del prototipo se realizó a través de un análisis estadístico, estático y dinámico para dos muestras aleatorias de temperatura, generando una alternativa para obtener resultados asociados a la medición con diferencia menor al 2% en las muestras dinámicas y del 1% en las muestras estáticas comparado con las estadísticas del sistema de referencia.*

**Palabras clave:** soldadura submarina; sensor; software; señales; temperatura; termopares.

### ABSTRACT

*Considering the need to determine the weldability process window, cycles and thermal inputs applied in underwater welding processes within the project “Analysis of underwater weldability in DH36 materials applied in tropical and polar environments for logistical support of scientific expeditions of Colombia in Antarctica”, a prototype system was designed for the acquisition of temperature signals by means of thermocouples installed on a metal plate. Based on this prototype, an algorithm for measuring and storing temperature variations was designed at LabVIEW™, using K-type thermocouples as sensors. The validation of the prototype was conducted through a statistical, static, and dynamic analysis for two random temperature samples, generating an alternative to obtain results associated to the measurement with a difference of less than 2% in the dynamic samples and 1% in the static samples compared to the statistics of the reference system.*

**Keywords:** underwater welding; sensor; software; signals; temperature; thermocouples.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para la Armada de Colombia la navegación en aguas con características polares se convirtió en un reto trascendental por no ser este un escenario habitual para las unidades navales de superficie que conforman su flota, las cuales no fueron construidas para desplegarse en este ambiente. Teniendo en cuenta lo anterior y dadas las condiciones propias de las aguas polares, se hizo necesario fortalecer capacidades para poder responder ante las contingencias que se puedan presentar durante los desplazamientos al Océano Antártico que realizan mencionadas unidades de superficie el marco de las Expediciones Científicas de Colombia en la Antártida.

Durante la navegación la estructura de un buque, en especial aquellas áreas que se encuentra cerca de la línea de flotación o por debajo de esta pueden verse afectadas por impactos directos con otros buques, artefactos navales, salientes rocosas y el fondo marino; cuando la navegación se realiza en aguas polares a estos riesgos descritos anteriormente se suma la posibilidad de colisionar con grandes pedazos de hielo conocidos como iceberg, en cualquiera que sea el caso, estos impactos pueden llegar a requerir una reparación que demande la aplicación de soldadura subacuática húmeda *in situ*, que permita a la embarcación salir de la zona del incidente y trasladarse a puerto seguro para valorar la magnitud de la afectación causada.

Tomando como base lo anterior, el conocer el comportamiento microestructural y los cambios en la composición química del acero y del material de aporte (electrodos) durante el desarrollo de soldadura subacuática húmeda en aguas polares, y como estas condiciones podrían influenciar la sanidad de la junta soldada, permite identificar los parámetros aplicables a los procedimientos de soldadura subacuática húmeda en este ambiente y su posible variación frente a los desarrollados en el trópico. La toma de los datos de temperatura y rata de enfriamiento en las zonas térmicamente afectadas, al momento de realizar la unión de la junta soldada bajo el agua *in situ*, se convierten en información esencial para el análisis antes mencionado del acero naval, y base para la posterior definición de parámetros requeridos para diseñar procedimientos de reparación con un alto grado de confiabilidad.

El desarrollo de soldadura subacuática húmeda con proceso SMAW y el análisis de tratamientos isotérmicos aplicados en aceros de construcción naval, actividades desarrolladas en el marco del proyecto “Análisis de soldabilidad submarina en materiales ASTM A131 grado DH36 aplicada en ambientes trópico y polar para apoyo logístico de expediciones científicas de Colombia en la Antártica” [1], evidencio la necesidad de contar un instrumento o sistema que permitiera la adquisición de datos asociados a la temperaturas en las zona térmicamente afectada de la junta soldada. Lo anterior conllevó al desarrollo de un trabajo de grado derivado de dicho proyecto marco [2], el cual generó un prototipo de un sistema para la adquisición de datos mediante la captación de temperaturas, por medio de termopares conectados a un acondicionador de señal, guardando la data en un computador para su posterior análisis en el software que complementa dicho prototipo desarrollado en LabVIEW™.

## 2. MARCO TEÓRICO

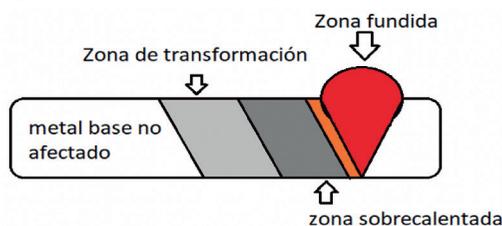
### 2.1 Soldadura Subacuática Húmeda con Proceso SMAW

La soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW, por sus siglas en inglés Shield Metal Arc Welding) es el método de aplicación manual más común para unir metales, dado que se realizan soldaduras de calidad y con una uniformidad excelente [3]. El arco eléctrico se alcanzan altas temperaturas con la capacidad de fundir el metal base que se va a soldar y el electrodo, el soldador controla los parámetros de velocidad de avance, longitud de arco, trabaja con valores de corriente y voltaje definidos en procedimientos de soldaduras especificados y aplica técnicas de soldadura recomendadas para el tipo de junta y posición de soldadura [4]. El grado de soldabilidad del material [5] [6] está determinado por la calidad de soldadura obtenida y facilidad a soldarse. Tiene en cuenta consideraciones como: la compatibilidad química del material base y de aporte, la conductividad y nivel de expansión térmica, la temperatura de fusión, espesor del material a unir, proceso de soldadura seleccionado, aporte térmico, variaciones y picos de temperatura alcanzados, velocidad de enfriamiento, requerimientos de precalentamiento, temperatura entre pasadas y tratamiento térmico posterior a la soldadura, y secuencias de soldadura aplicadas. En ambientes subacuáticos es muy común utilizar el proceso SMAW para la reparación de embarcaciones navales, plataformas petroleras, oleoductos y gasoductos, entre otras construcciones subacuáticas [7] [8]

En la soldadura húmeda subacuática con proceso SMAW se unen dos metales de forma similar a la soldadura superficial, en este caso la soldadura húmeda se hace en contacto directo con el agua, en el cual la profundidad en la que se realiza la soldadura es un factor muy importante por las presiones ejercidas que influyen en la sanidad de la soldadura [8]. Para obtener soldaduras húmedas aceptables son necesarios electrodos especiales con revestimientos impermeables, que además de su composición química favorable para la soldabilidad del material base sean resistentes al agua y protejan su integridad [9]. Durante la soldadura húmeda el agua se descompone en sus elementos de hidrógeno y oxígeno, el electrodo al fundirse propicia la formación de gases que reaccionan químicamente con el material base, mejoran la apariencia del cordón de soldadura, crea una atmósfera gaseosa que mantiene el arco eléctrico estable evitando su extinción, minimizando el rápido enfriamiento del metal de soldadura causado por el agua, algunos contribuyen a controlar la cantidad de hidrógeno difusible en el depósito de soldadura de aceros [10].

En la soldadura subacuática húmeda debido a los ciclos y aportes térmicos experimentados durante la soldadura y la exposición continua al agua se experimentan altas velocidades de enfriamiento superiores a las desarrolladas en soldaduras al aire, que originan porosidades, cambios microestructurales, pérdidas de ductilidad y tenacidad en el material soldado [11] [12]. Para la medición de los ciclos térmicos de soldadura son localizadas termocuplas en diferentes lugares de la junta a soldar, específicamente en la zona afectada térmicamente adyacente al cordón de soldadura y en la región del metal base no afectado por el calor [13] [14] (Ver figura 1).

Figura 1. Zona Afectada por la Temperatura. (Fuente: Autores).  
Figure 1. Area affected by temperature (Source: Authors).



## 2.2 Sistemas de Adquisición de Datos en Procesos Térmicos

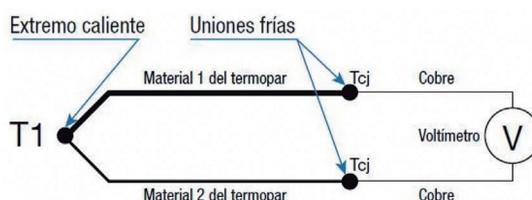
El término adquisición de datos suele usarse con frecuencia en sistemas cuyas entradas desde los sensores están convertidas a la forma digital para procesamiento, análisis y exhibición en una computadora. Por lo tanto, los sistemas contienen: sensores, cableado para conectar los sensores para el acondicionamiento de señal para llevar a cabo la filtración y la amplificación. La adquisición de datos del hardware desempeña funciones como conversión de señal a formato digital y el software se encarga de analizar las señales de entrada digital [15].

Todos los módulos DAQ usan conductores, software suministrado, por lo general, por el fabricante, con un módulo, para comunicar con la computadora y decirle que ha sido insertado y como puede la computadora comunicarse con el dicho elemento. Antes de que se pueda usar un tablero se deben establecer parámetros, estos son las direcciones de los canales de entrada y salida, el nivel de interruptor y el canal a ser usado para el acceso de memoria directa. La aplicación del software puede usarse para ayudar en el diseño de los sistemas de medición y análisis de datos. Como por ejemplo el tipo de software de aplicación disponible, LabVIEW™ el cual es un paquete de software de programación gráfica desarrollado por National Instruments para la adquisición de datos y control de instrumento, estos son llamados instrumentos virtuales porque en apariencia y operación imitan instrumentos reales [15]. LabVIEW™ permite adquirir rápidamente los datos de las medidas con su hardware NI DAQ, con una representación visual de su hardware, obtiene acceso al instante a sus datos para validar el cableado y la configuración del hardware. LabVIEW™ permite conectar al instante con hardware de medidas, reduciendo el tiempo de configuración y creando una mayor fiabilidad en las mediciones [16] [17].

Uno de los elementos fundamentales para el desarrollo de cualquier sistema de adquisición de datos en procesos térmicos es el sensor, este constituye un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida en función de la variable de medida. Estos sensores permiten tener un conocimiento muy preciso de las cantidades físicas que por su naturaleza o tamaño no pueden ser percibidas directamente por los sentidos [18]. Ha-

ciendo énfasis en el termopar, se dice que es un mecanismo de medida de temperatura que está constituido por dos alambres de material diferente '1' y '2', y además dos juntas diferentes de medición 'a' y 'b', esto a temperaturas diferentes surgirá una fuerza electromotriz (FEM), esta FEM normalmente está en orden de los milivoltios (mV) en los puntos 'a' y 'b' y esto se describe como una tensión termoeléctrica [19] [20]. Estos milivoltios son caracterizados y gracias a eso se puede cuantificar la temperatura a la cual el termopar es sometido, esta se registra y muestra posteriormente con un circuito digital o analógico. Los termopares tienen una gran variedad y su uso generalmente es industrial, pero sus aplicaciones en el área de la investigación y las industrias son notables [21] [22], [20].

Figura 2. Principio simplificado de un termopar (Fuente: [23]).  
 Figure 2. Principle of a simplified thermocouple (Source: [23]).



Para aplicar el efecto Seebeck a la medida de temperaturas, es necesario mantener una de las uniones a una temperatura de referencia. Una solución consiste en disponer la unión de referencia en hielo fundente, es una solución de gran exactitud y facilidad de montaje, pero es de difícil mantenimiento y coste alto. Para usar este método siempre se debe usar una gran cantidad de hilo de uno del termopar. Otra solución es usar ambos hilos con una temperatura constante y ampliar la conexión con hilos de cobre, y por último esta la solución es tener ambos hilos a una temperatura ambiente que está variando, pero estas variaciones son detectadas por otro sensor de temperatura, y se suma una tensión igual a la generada en la unión fría (ver figura 2)

### 3. METODOLOGÍA

Con relación a la investigación se puede decir que es de tipo aplicada, descriptiva y con un enfoque cuantitativo, permitiendo el análisis de casos y la observación como métodos para la recolección de la información y/o datos teóricos base para el diseño del prototipo de adquisición de señales de temperatura.

Para el diseño del prototipo de sistema fue necesaria la definición de los requerimientos y análisis de adquisición de datos de temperatura, el diseño de un sistema de control de variables e incertidumbre en el proceso, la adquisición y procesamiento de datos, condiciones de operación, entre otras.

En términos generales el modelado del sistema para la adquisición de datos de temperatura diseñado, se basa en un diagrama de flujo que describe el procedimiento de soldadura y como se efectuara la toma de datos. Una vez inicie la soldadura de la junta el sistema empieza a registrar los datos, preguntando cada cierta cantidad de muestras si el procedimiento continúa en ejecución para seguir o detener la captura de mencionados datos.

Para llevar a cabo el sistema de control (para el software) se seleccionó LabVIEW™ como entorno de desarrollo, en el cual se utiliza una lógica de bloques con su librería DAQ, que implementa un bucle con un asistente por medio del cual se configura el tipo de sensor, la cantidad de muestras, y la frecuencia que serán almacenadas en un archivo "XLSX", guardando la variable de temperatura y el tiempo exacto en el que fue medida, para su posterior procesamiento, con un análisis estadístico el cual determinara las tasas de enfriamiento, picos de temperatura y desviaciones.

El prototipo del sistema para la adquisición de señales de temperatura consta de componentes principales, el hardware del fabricante National Instruments y el software desarrollado antes mencionado; en cuanto al hardware está compuesto por el Chasis NI CompactDAQ Ethernet modelo NI 9188, el módulo de la serie C NI9214 y el módulo isotérmico TB 9214, a este módulo isotérmico se conectan los hilos de los termopares, permitiendo así la comunicación con el computador (ver Figura 3).

**Figura 3.** Estructura de un sistema de adquisición y registro de datos (Fuente: Autores).  
**Figure 3.** Data acquisition and recording system structure (Source: Authors).



El software está conformado por un diagrama de bloques desarrollado en el IDE de LabVIEW™ con su respectivo panel frontal, de tal manera que se puedan agregar uno o más sensores con su respectiva marca en el Backup de datos según sea la necesidad del usuario. El chasis CompactDAQ Ethernet está diseñado para permitir conectar módulos adicionales para la medición de diferentes variables físicas, acondicionarlas y comunicarlas por un cable de ethernet hacia el computador por medio de LAN, que en este caso va en conjunto con el módulo NI 9214 y el módulo isotérmico TB 9214 para la conectividad con los termopares. Este módulo viene con características excepcionales y precisión operativa incorporando 16 canales integrados, y suprimiendo el ruido a unas frecuencias de 50/60 Hertz. Adicionalmente es utilizado en conjunto con el bloque isotérmico TB 9214 el cual es un accesorio que permite tener tres juntas frías para compensar los canales.

Los termopares tipo K son los principales sensores utilizados para el muestreo de temperatura, los cuales admiten una temperatura de entre  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta  $1372\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con dos hilos uno positivo y otro negativo sabiendo que el cable recubierto por una malla amarilla es el positivo y el cable recubierto por una malla roja es el negativo, esto con el fin de conectar de manera adecuada al módulo TB 9214.

Para llevar a cabo un plan para determinar la incertidumbre fue necesario especificar el mensurando siendo muy claro y sin ambigüedades sobre lo que se va a medir temperatura y tiempo, así también fue necesario identificar las posibles fuentes de incertidumbre creando una lista y un diagrama de causa y efecto detallando todas las posibles causas de mencionadas fuentes, luego de esto se hizo necesario cuantificar la incertidumbre, asignándole una ponderación estimada para su cálculo basada en la Norma ISO 5725. Seguido a lo anterior se calculó la incertidumbre combinada basado en la desviación estándar de la dispersión de la muestra, por último, se informó la incertidumbre dando descripción de los métodos empleados para calcular el resultado de la medida a partir de observaciones experimentales y de datos aportados.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Métodos y elementos para la calibración del prototipo del sistema para adquisición de datos de temperaturas

Para la calibración del prototipo se utilizó el método comparativo de dos muestras aleatorizadas, con una entrada de muestras que proviene de sensores que están calibrados, con un termómetro de mercurio de laboratorio, un termómetro digital nuevo, y también un pirómetro calibrado a la emisividad del material. El termómetro digital punzón rango de temperatura esta entre  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  adicionalmente tiene una resolución de 0.1 grados, así mismo el termómetro de mercurio para inmersión tiene un rango de temperaturas  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  con una resolución de 2 grados por marca y las recolectadas por el sistema de adquisición de señales.

Se utilizo un Beaker para medir 300 mililitros de agua y realizar las calibraciones bajo las mismas condiciones; para calentar la placa de vidrio cerámico que transfiere el calor de manera controlada hacia el Beaker se empleó un flamero de gas y un asistente mecánico para sostener los termómetros, con el fin de mantenerlos estáticos y a la misma altura de inmersión.

Para la toma de datos del prototipo se planteó la circunstancia de calibración de agua hirviendo la cual tiene una temperatura de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  teórica siguiendo el procedimiento TH-003 [24], en el cual los termómetros de mercurio y

digitales censarían esta temperatura constantemente en paralelo al sistema desarrollado, por lo cual, las temperaturas captadas por los termómetros a los tiempos se deberían registrar en la hoja de datos que arroja el software. Para esta calibración se utilizaron tres termopares ajustándose el software a esa cantidad, programando los canales físicos a2, a4, a5, asignándoles respectivamente el nombre “K-type Temp1\_1”, “K-type Temp1\_2”, “K-type Temp1\_3”, para diferenciarlos en la hoja de datos. La frecuencia se asignó en 3 Hertz, con un limitador de 5 ejemplos y 10 segundos de timeout (ver figura 4 y 5)

Figura 4. Panel frontal preconfigurado (Fuente: Autores).  
 Figure 4. Front panel preconfigured (Source: Authors).

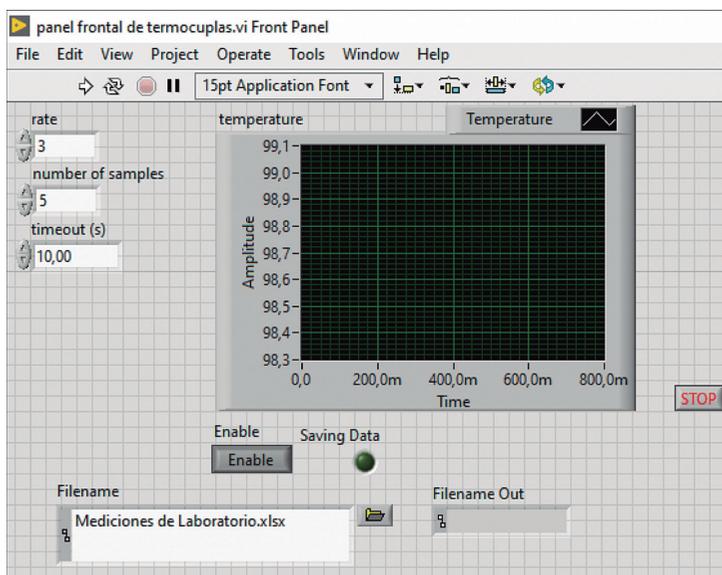
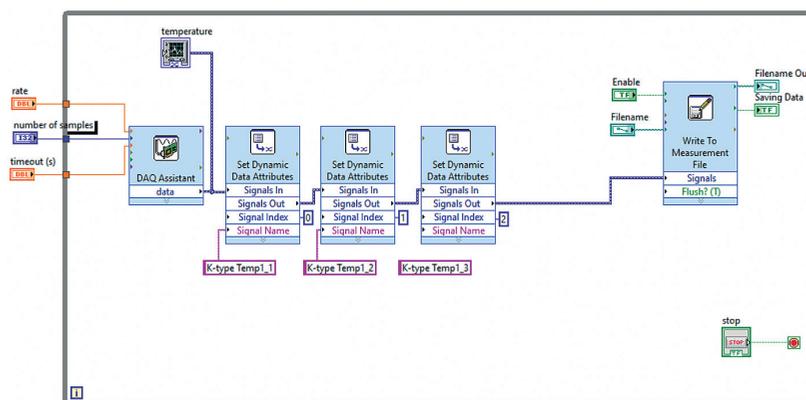


Figura 5. Diagrama de bloques preconfigurado (Fuente: Autores).  
 Figure 5. Block diagram preconfigured (Source: Authors).



Para captar las temperaturas por parte de los sensores termopares se sumergieron en el agua teniendo mucho cuidado que no se tocaran entre si ni tocaran las paredes del recipiente, al mismo tiempo que estuvieran a la misma profundidad a las que se encontraban los instrumentos de referencia, esto para mantener las condiciones lo más parecidas posibles.

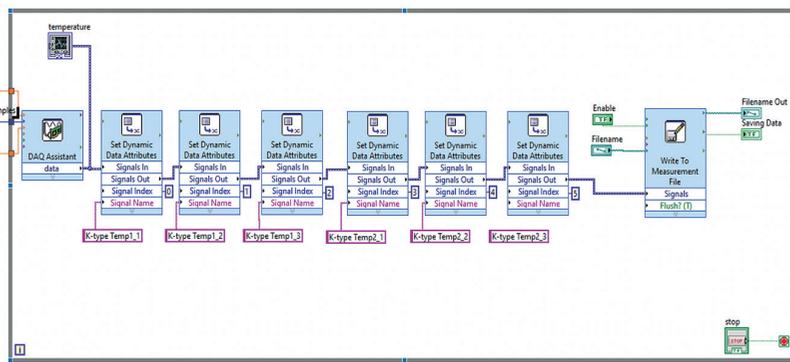
#### 4.2 Algoritmo para la adquisición de datos

El diagrama de bloques presentado (ver figura 6) se detallan las etapas del proceso lógico de adquisición de señales, las cuales han sido implementadas en el software desarrollado en programación grafica labVIEW™. Las medidas desarrolladas por el hardware constituido principalmente por los sensores de temperatura (Termopares), se

aprecian en la herramienta DAQ Assistant, quien se encarga de leer los datos provenientes de los sensores mediante el sistema de adquisición físico para posteriormente, incorporar el componente graficador de señales (software), a través de este último se pretende visualizar en tiempo real las señales captadas con los termopares.

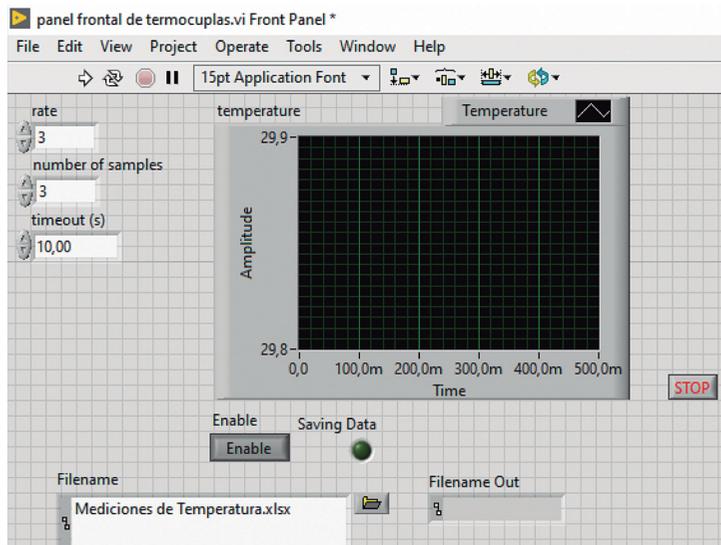
Conectados a la salida del DAQ Assistant, se aprecian bloques o herramientas asistentes (Set Dynamic Data Attributes) que permiten diferenciar las mediciones que salen de cada canal físico de la DAQ (Señales de los termopares), estos bloques se escriben en un documento de formato XLSX diferenciando las medidas de cada sensor en columnas diferentes, en este caso se utiliza una denominación en forma de matriz mxn para diferenciar las medidas, este proceso se lleva a cabo mediante el bloque asistente Write To Measurement File. Todo esto se encuentra contenido en un bucle While, para realizar medidas indefinidamente hasta que se le dé al botón de stop ubicado también en el esquema principal del diagrama de bloques.

Figura 6. Diagrama de bloques del código implementado (Fuente: Autores).  
 Figure 6. Block diagram of the implemented code (Source: Authors).



En la figura 7 se observa el panel frontal que representa la lógica que se desarrolló en el diagrama de bloques (Figura 6), este el asistente tiene tres variables “Rate” que establecen la frecuencia con que se van a tomar las muestras, el número de ejemplos que a su vez define cuantas mediciones va a tomar por ciclo, el tiempo de salida que determina el límite de tiempo para tomar las mediciones a la frecuencia especificada y su número de ejemplos, así mismo, se especifica el nombre del archivo y la ubicación donde se van a guardar los datos de temperatura y tiempo, este se almacena en un archivo por cada ciclo, la cantidad de archivos serán establecidos por el usuario acorde al inicio y parada del proceso de captura de datos.

Figura 7. Panel frontal del código implementado (Fuente: Autores).  
 Figure 7. Implemented code front panel (Source: Authors).



El "Filename" especifica que nombre va a llevar el archivo que se crea o se guardan continuamente los datos, para iniciar el proceso es necesario dar clic en Run  el cual se encuentra simbolizado con la flecha blanca hacia la derecha, para detener el proceso se debe presionar el botón Stop que se encuentra en la parte derecha del panel frontal o presionar el botón detener que esta simbolizado con , y de la misma manera detiene el proceso.

### 4.3 Sistema de Sujeción de Termopares

En términos generales la estructura del dispositivo consta de tres piezas las cuales se pueden mover sobre el eje paralelo de la cara superior o inferior de la probeta dependiendo de la necesidad del estudio mediante un mecanismo accionado por unos tornillos. Cada costado del dispositivo de sujeción posee un tornillo en la parte superior, lo que le permite sujetarse a la probeta y como fuerza opuesta posee dos tornillos a los costados de la cara contraía para adaptarse a diferentes grosores de probetas. Este sistema permite sujetarse firmemente a la placa por medio de una sujeción mecánica no invasiva hacia la probeta, pero a la vez, permitiendo mover el dispositivo según las necesidades del estudio y al ser simétrico puede ir al derecho y al revés flexibilizando su uso. Las piezas móviles poseen una perforación para poder roscar los termopozos de acero inoxidable, esta rosca al ser universal, permite diseñar los termopozos con una tolerancia especificada por las necesidades del estudio, y siendo esta rosca la que permite una adaptabilidad vertical a los grosores de la probeta, en este caso, se hace una relación matemática con el teorema de Pitágoras, dando un resultado de un largo del bulbo de 2 pulgadas y una tolerancia en la rosca de media pulgada para el estudio que aquí se realiza. Este modelo se aplicará simétricamente en ambas placas de la junta soldada permitiendo tener seis medidas en tiempo real a diferentes distancias en la ZAT.

### 4.4 Validación del Prototipo de Sistema para Medición de Temperaturas

Se realizaron ejercicios de validación y de estos se procedió a realizar un análisis de las pruebas realizadas para la validación del prototipo.

#### 4.4.1 Preparación de las muestras

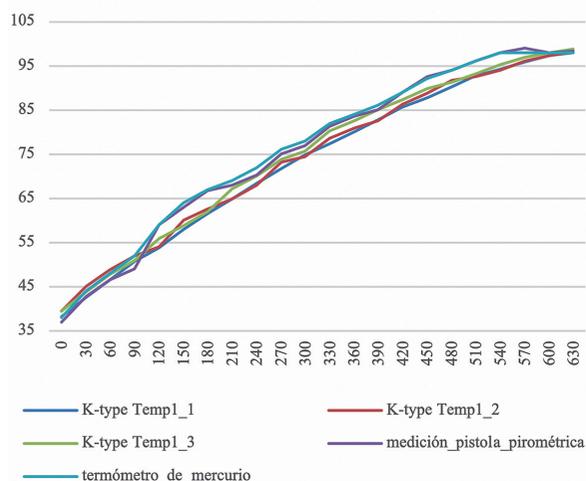
Para las muestras se utilizó un Beaker de 300 mililitros con agua a temperatura ambiente, teniendo en cuenta que las pruebas realizadas se hicieron en un laboratorio de química esterilizado, y climatizado a 23 °C con una humedad relativa de 51%. La fuente de calor era constante a 380 °C, para asegurar la repetitividad se manejaron las mismas condiciones para la recolección de las muestras, utilizando el mismo observador, los mismos instrumentos y un corto periodo de tiempo.

Se realizaron dos tipos de pruebas una estática y otra dinámica, para la estática se dejó hervir el agua a su punto de ebullición y estabilización, arrojando unas temperaturas muy cercanas a los 100 °C teóricos, en los cuales los instrumentos de referencia termómetro digital y termómetro de mercurio, arrojaron mediciones de 98 °C  $\pm$  1 °C; teniendo en cuenta que el agua no estaba generando burbujas en gran cantidad siendo un resultado muy acorde a la realidad por lo cual se acepta y se procede a realizar mediciones con el sistema de adquisición de datos durante 30 segundos, tomándose mediciones cada segundo con los instrumentos calibrados, esto con el fin de hacer un estudio comparativo de dos muestras simple tal como explica Montgomery [25].

#### 4.4.2 Análisis de las muestras dinámicas

Para el estudio dinámico se calentó agua desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de ebullición, tomando medidas cada 30 segundos por parte del observador y cada 0.333 segundos por parte del prototipo teniendo una data de más de 9000 mediciones, por lo cual se discrimino desde la temperatura desde 38 grados, hasta la temperatura de ebullición. Con la ayuda del software Statgraphics® se realizó un análisis estadístico comparativo de dos muestras y Excel® generando unas graficas muy parecidas validando que el sistema tiene una excelente repetibilidad (ver figuras 8, 9 y 10, y tablas 1, 2 y 3).

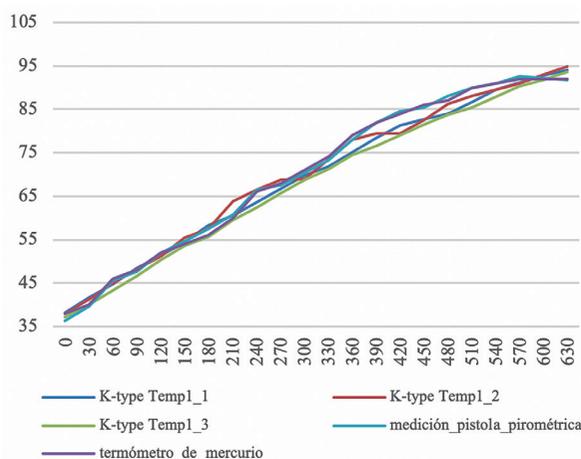
**Figura 8.** Gráfica de la primera muestra dinámica (Fuente: Autores).  
**Figure 8.** First dynamic sample graph (Source: Authors).



**Tabla 1.** Estadísticas resumidas primera muestra (Fuente: Autores).  
**Table 1.** First sample summary statistics (Source: Authors).

	A.K Type Temp1 1	A.K Type Temp1 2	A.K Type Temp1 3
Count	21	21	21
Average	74,9709	75,7019	76,3832
Standard deviation	17,6954	17,1898	17,7244
Coeff. of variation	23,603%	22,7072%	23,2045%
Minimum	42,5959	45,1233	43,8003
Maximum	97,9464	98,0722	98,8158
Range	55,3505	52,949	55,0154
Std. skewness	-0,69672	-0,629817	-0,810139
Std. kurtosis	-1,04278	-1,12427	-1,03691
medición pistola pirométrica			termómetro de mercurio
Count	21		21
Average	77,7095		78,2857
Standard deviation	18,1786		17,5247
Coeff. of variation	23,393%		22,3855%
Minimum	42,7		44,0
Maximum	99,0		98,0
Range	56,3		54,0
Std. skewness	-1,0034		-1,04188
Std. kurtosis	-0,799141		-0,788396

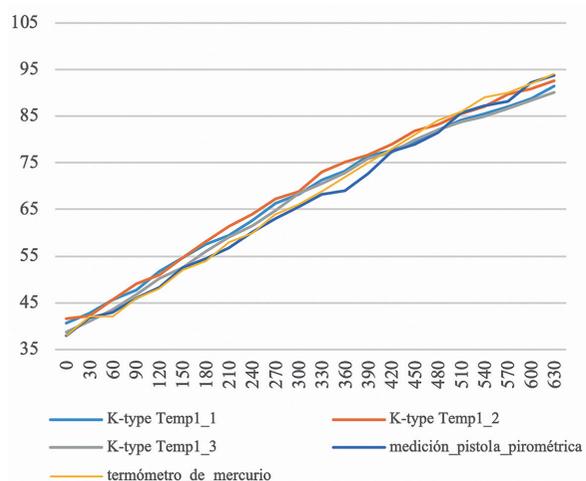
**Figura 9.** Gráfica de la segunda muestra dinámica (Fuente: Autores).  
**Figure 9.** Graph of the second dynamic sample (Source: Authors).



**Tabla 2.** Estadísticas resumidas segunda muestra (Fuente: Autores).  
**Table 2.** Summary statistics of the second sample (Source: Authors).

	A.K Type Temp1 1	A.K Type Temp1 2	A.K Type Temp1 3
Count	22	22	22
Average	69,3223	69,9848	68,1073
Standard deviation	17,6904	17,8472	17,8403
Coeff. of variation	25,5191%	25,5015%	26,1944%
Minimum	38,0785	38,0093	37,2271
Maximum	94,0659	94,8179	93,5114
Range	55,9874	56,8086	56,2843
Std. skewness	-0,482996	-0,638431	-0,469026
Std. kurtosis	-1,14224	-1,08395	-1,1483
medición pistola pirométrica			termómetro de mercurio
Count	22		22
Average	70,3091		70,3636
Standard deviation	18,6017		18,456
Coeff. of variation	26,457%		26,2294%
Minimum	36,4		38,0
Maximum	92,5		92,0
Range	56,1		54,0
Std. skewness	-0,723134		-0,675032
Std. kurtosis	-1,1645		-1,25506

**Figura 10.** Gráfica de la tercera muestra dinámica (Fuente: Autores).  
**Figure 10.** Third dynamic sample graph (Source: Authors).



**Tabla 3.** Estadísticas resumidas tercera muestra (Fuente: Autores).  
**Table 3.** Summary statistics of the third sample (Source: Authors).

	A.K Type Temp1 1	A.K Type Temp1 2	A.K Type Temp1 3
Count	22	22	22
Average	67,912	69,0263	67,044
Standard deviation	16,017	16,6274	16,5288
Coeff. of variation	23,585%	24,0886%	24,6536%
Minimum	40,6007	41,5176	38,7885
Maximum	91,3537	92,6889	90,0434
Range	50,7531	51,1712	51,2549
Std. skewness	-0,475663	-0,483447	-0,535134
Std. kurtosis	-1,17222	-1,1803	-1,20363
medición pistola pirométrica			termómetro de mercurio
Count	22		22
Average	66,5636		67,2727
Standard deviation	17,4922		18,0639
Coeff. of variation	26,2789%		26,8517%
Minimum	38,0		38,0
Maximum	93,7		94,0
Range	55,7		56,0
Std. skewness	-0,0489906		-0,160348
Std. kurtosis	-1,19072		-1,27126

(Fuente: Autores).

Las anteriores tablas muestran estadísticas resumidas para cada una de las variables de datos seleccionadas. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son la asimetría y la curtosis estandarizadas, que se pueden usar para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Al comparar las tres pruebas que se hicieron se observa que las gráficas tienen una tendencia lineal al aumentar la temperatura con respecto al tiempo, el resumen estadístico muestra que, con 22 muestras, el prototipo tiene unas diferencias menores al 2% de con respecto a las estadísticas del sistema de referencia.

### 4.3 Análisis de las muestras estáticas

Para el estudio estático se calentó agua hasta la temperatura de ebullición, tomando medidas cada segundo por parte del observador y cada 0.333 segundos por parte del prototipo teniendo una data de 18 y 60 mediciones respectivamente. Para facilitar el registro de datos se tomaron videos de las mediciones del termómetro de mercurio y el termómetro digital. Con la ayuda del software Statgraphics® se realizó un análisis estadístico comparativo de dos muestras y Excel® generando unas graficas muy parecidas validando que el sistema tiene una excelente repetibilidad y exactitud con respecto al sistema de referencia, así mismo se le hace un análisis estadístico con un nivel confianza del 95 % (ver figuras 11, 12 y 13 y tablas 4, 6 y 8).

Figura 11. Gráficos de datos de la primera medición (Fuente: Autores).  
Figure 11. Data graphs of the first measurement (Source: Authors).

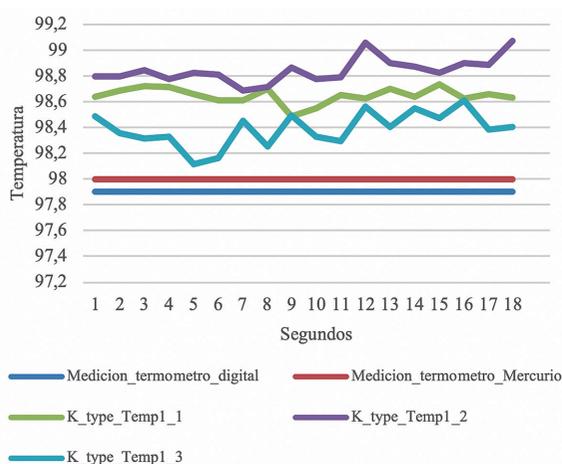


Tabla 4. Resumen estadístico primera muestra (Fuente: Autores).  
Table 4. Statistical summary of the first sample (Source: Authors).

	A.K Type Temp1 1	A.K Type Temp1 2	A.K Type Temp1 3
Count	18	18	18
Average	98,6484	98,8458	98,388
Median	98,6454	98,8277	98,3928
5% Trimmed mean	98,6522	98,8416	98,3905
Variance	0,00381564	0,00980229	0,017757
Standard deviation	0,0617709	0,0990065	0,133255
Coeff. of variation	0,0626172%	0,100163%	0,135439%
Standard error	0,0145595	0,0233361	0,0314086
Minimum	98,4902	98,6907	98,1173
Maximum	98,7389	99,0763	98,6128
Range	0,248704	0,385642	0,495434
Std. Skewness	-1,58918	1,78817	-0,555189
Kurtosis	1,37132	1,43056	-0,214124
Std. Kurtosis	1,18759	1,2389	-0,185437

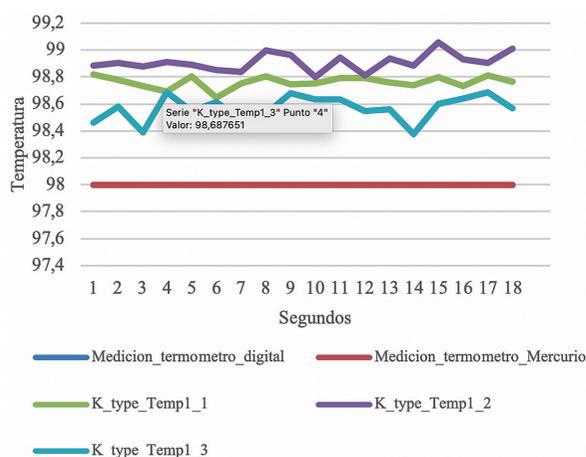
Esta tabla muestra estadísticas resumidas para cada una de las variables de datos de temperatura del sistema de adquisición de señales.

Tabla 5. Confidence intervals of 95 % for the first sample (Source: Authors).  
Table 5. 95% confidence intervals of the first sample (Source: Authors).

	Mean	Std. error	Lower limit	Upper limit
K type Temp1 1 1	98,6483	0,014377	98,618	98,6787
K type Temp1 2 1	98,8461	0,0235027	98,7965	98,8957
K type Temp1 3 1	98,3878	0,0313066	98,3217	98,4538
	Sigma	Lower limit	Upper limit	
K type Temp1 1 1	0,0609966	0,0457711	0,0914427	
K type Temp1 2 1	0,0997136	0,0748239	0,149485	
K type Temp1 3 1	0,132823	0,0996684	0,19912	

La tabla 5, muestra intervalos de confianza del 95 % para las medias y desviaciones estándar de cada una de las variables. Estos intervalos vincularon el error de muestreo en las estimaciones de los parámetros de las poblaciones de las que provienen los datos.

**Figura 12.** Gráfico de datos de la segunda medición (Fuente: Autores).  
**Figure 12.** Data graph of the second measurement (Source: Authors).



**Tabla 6.** Resumen estadístico segunda muestra (Fuente: Autores).  
**Table 6.** Statistical summary of the second sample (Source: Authors).

	A.K Type Temp1 1	A.K Type Temp1 2	A.K Type Temp1 3
Count	18	18	18
Average	98,7757	98,9591	98,4448
Median	98,782	98,9509	98,4402
5% Trimmed mean	98,7781	98,9547	98,4478
Variance	0,00235108	0,00651058	0,0204995
Standard deviation	0,0484879	0,0806881	0,143176
Coeff. of variation	0,0490889%	0,0815369%	0,145438%
Standard error	0,0114287	0,0190184	0,033747
Minimum	98,67	98,8504	98,1404
Maximum	98,8379	99,1455	98,6956
Range	0,167949	0,295084	0,555189
Std. skewness	-0,810984	1,83097	-0,904656
Kurtosis	-0,580563	0,976177	0,195312
Std. kurtosis	-0,502782	0,845394	0,169145

La tabla 6, muestra estadísticas resumidas para cada una de las variables de datos seleccionadas. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. En esta es de particular interés que la asimetría y la curtosis estandarizadas, se pueden usar para determinar si la muestra proviene de una distribución normal.

**Tabla 7.** Intervalos de confianza del 95 % de la segunda muestra (Fuente: Autores).  
**Table 7.** Confidence intervals of 95 % for the second sample (Source: Authors).

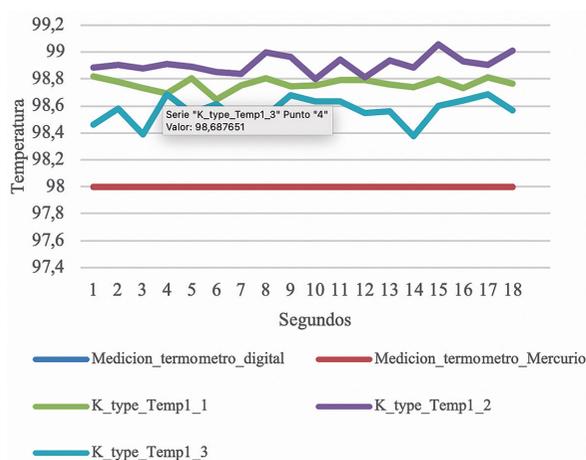
	Mean	Std. error	Lower limit	Upper limit
K type Temp1 1 2	98,775	0,0114974	98,7507	98,7993
K type Temp1 2 2	98,9589	0,0191808	98,9184	98,9994
K type Temp1 3 2	98,445	0,0340535	98,3732	98,5168

	Sigma	Lower limit	Upper limit
K type Temp1 1 2	0,0487792	0,0366033	0,0731271
K type Temp1 2 2	0,081377	0,0610643	0,121996
K type Temp1 3 2	0,144477	0,108414	0,216591

Con relación a la tabla 7 muestra intervalos de confianza del 95 % para las medias y desviaciones estándar de cada una de las variables. Estos intervalos vincularon el error de muestreo en las estimaciones de los parámetros de las poblaciones de las que provienen los datos.

**Figura 13.** Gráfico de datos de la tercera medición (Fuente: Autores).  
**Figure 13.** Data graph of the third measurement (Source: Authors).



**Tabla 8.** Resumen estadístico tercera medición (Fuente: Autores).  
**Table 8.** Statistical summary of the third measurement (Source: Authors).

	A.K Type Temp1 1	A.K Type Temp1 2	A.K Type Temp1 3
Count	18	18	18
Average	98,7628	98,9117	98,5678
Median	98,76	98,9	98,575
Variance	0,00193889	0,00466176	0,00857124
Standard deviation	0,0440328	0,0682771	0,092581
Coeff. of variation	0,0445844%	0,0690284%	0,0939262%
Standard error	0,0103786	0,0160931	0,0218216
Minimum	98,65	98,8	98,38
Maximum	98,82	99,06	98,69
Range	0,17	0,26	0,31
Std. skewness	-1,57088	0,735591	-1,22436
Kurtosis	1,04111	0,0762793	-0,129363
Std. kurtosis	0,901629	0,0660598	-0,112031

**Tabla 9.** Intervalos de confianza del 95 % de la tercera muestra (Fuente: Autores).  
**Table 9.** 95% confidence intervals of the third sample (Source: Authors).

	Mean	Std. error	Lower limit	Upper limit
I.K type Temp1 1	98,7628	0,0103786	98,7409	98,7847
I.K type Temp1 2	98,9117	0,0160931	98,8777	98,9456
I.K type Temp1 3	98,5678	0,0218216	98,5217	98,6138
	Sigma	Lower limit	Upper limit	
I.K type Temp1 1	0,0440328	0,0330417	0,0660115	
I.K type Temp1 2	0,0682771	0,0512343	0,102357	
I.K type Temp1 3	0,092581	0,0694716	0,138792	

La tabla 9, muestra intervalos de confianza del 95 % para las medias y desviaciones estándar de cada una de las variables. Estos intervalos vincularon el error de muestreo en las estimaciones de los parámetros de las poblaciones de las que provienen los datos. Por último, se relacionan los resúmenes de las medias de las muestras y de los errores absolutos respecto a la referencia (ver tabla 10 y 11).

**Tabla 10.** Resumen de las medias de las muestras (Fuente: Autores).  
**Table 10.** Summary of sample averages (Source: Authors).

	Media TK1	Media TK2	Media TK3	Valor de referencia
1	98,6484	98,8458	98,388	98
2	98,7820	98,9509	98,4402	98
3	98,76	98,9	98,575	98

**Tabla 11.** Resumen de errores absolutos respecto a la referencia (Fuente: Autores).  
**Table 11.** Absolute error summary related to the reference (Source: Authors)..

	Error absoluto TK1	Error absoluto TK2	Error absoluto TK3	Error relativo TK1	Error relativo TK2	Error relativo TK3
1	0,6484	0,8458	0,3880	0,66%	0,86%	0,39%
2	0,7820	0,9509	0,4402	0,79%	0,97%	0,45%
3	0,7600	0,9000	0,5750	0,77%	0,91%	0,58%

## 5. CONCLUSIONES

Basado en la información obtenida, se puede concluir que el estudio realizado del sistema de medición de temperatura tiene una excelente repetitividad y exactitud con respecto al sistema de referencia, tanto en el análisis de muestras dinámicas como estáticas.

Además, se puede observar una tendencia lineal en el aumento de la temperatura con respecto al tiempo en ambos análisis. Los intervalos de confianza del 95 % para las medias y desviaciones estándar de cada una de las variables muestran una estimación de la precisión de las medidas obtenidas y proporcionan una medida de la incertidumbre en los resultados. En general, los resultados del estudio indican que el sistema de medición de temperatura es confiable y se puede utilizar con confianza en futuros experimentos y mediciones.

A partir de las mediciones y el análisis estadístico se evidencia que el Software, está captando las señales de manera adecuada, y dada las características del módulo NI 9214 y TB 9214, se obtienen unas mediciones muy precisas en las muestras del análisis estático y dinámico.

En todas las ocasiones se dan unas medidas que están muy cercanas a la medición del instrumento de referencia, en el caso de la medición estática, se obtuvo un error absoluto promedio del termopar TK1, TK2, TK3 de  $\pm 0,7301$ ,  $\pm 0,8989$ ,  $\pm 0,4677$ , respectivamente. Con esto se acepta las mediciones y se aprueba el error dado que es inferior a  $\pm 1$  °C, validando que el software se acopla con el hardware de la manera esperada y está listo para realizar mediciones en ambientes submarinos con un error inferior al 1°C y una confiabilidad del 95 % aplicando un análisis estadístico comparativo simple para dos muestras aleatorizadas.

Por último, se pueden destacar otros hallazgos importantes a partir de los resultados presentados:

- La muestra de datos utilizada es lo suficientemente grande como para obtener estadísticas significativas que permiten hacer conclusiones precisas acerca de la precisión y repetibilidad del sistema de medición.

- El hecho de que las gráficas generadas por el software Statgraphics y Excel sean similares valida la consistencia y precisión de los datos obtenidos por el sistema de medición.
- El análisis estadístico de las muestras estáticas indica que el sistema de medición tiene una exactitud aceptable con respecto al sistema de referencia, con un intervalo de confianza del 95 %. Esto significa que se puede tener un alto grado de confianza en las mediciones obtenidas por el sistema.
- El análisis estadístico de las muestras dinámicas muestra que el sistema de medición tiene una diferencia menor al 2% en comparación con las estadísticas del sistema de referencia. Esto indica que el sistema de medición es altamente repetible y se pueden obtener mediciones precisas en diferentes condiciones de temperatura.
- La tendencia lineal observada en las gráficas indica que el sistema de medición es consistente en su medición de la temperatura en un rango de temperaturas específico. Esto es importante porque muestra que el sistema de medición es confiable y preciso para su uso en experimentos y mediciones que involucren mediciones de temperatura en este rango.
- El sistema de medición de temperatura utilizado es confiable, preciso y altamente repetible.
- El sistema es adecuado para su uso en una variedad de aplicaciones que requieren mediciones precisas y consistentes de la temperatura en un rango específico.

## 6. REFERENCIAS

- [1] L. C.-M. E. N.-N. E. A. Bastos-Blandón, «Análisis de soldabilidad submarina en materiales DH36 aplicada en ambientes trópico y polar para apoyo logístico de expediciones científicas de Colombia en la Antártica,» Barranquilla, 2019.
- [2] K. B.-S. E. N.-N. L. Parra-Pacheco, «Diseño y Desarrollo de Sistema Adquisición de Señales de Temperatura y Ciclos Térmicos de Soldaduras Submarina Trópico y Antártica,» Barranquilla, 2022.
- [3] Jeffus L., *Welding: principles and applications*, United States of America: CENGAGE, 2020.
- [4] E. E. N. J. T. S. Heriberto Maury Ramírez, *Diseño para la fabricación y ensamble de productos soldados*, Barranquilla, Colombia: Uninorte, 2009.
- [5] O. S. Odebiyi, S. M. Adedayo, L. A. Tunji y M. O. Onuorah, «A review of weldability of carbon steel in arc-based welding processes» *Cogent Engineering*, vol. 6, n° 1, p. 609180, 2019.
- [6] E. E. Niebles Núñez, «Concurrencia de las tecnologías de soldadura en las construcciones soldadas,» *Prospectiva*, vol. 9, n° 1, pp. 38-45, 2011.
- [7] E. Surojo, A. H. Gumilang, T. Triyono, A. R. Prabowo, E. P. Budiana y N. Muhayat, «Effect of Water Flow on Underwater Wet Welded A36 Steel» *Metal*, vol. 11, n° 5, p. 682, 2021.
- [8] F. Macías López, L. E. Ramírez Vidaurri, J. L. Acevedo Dávila, H. M. Hdz-García, A. Hernández-Rodríguez y J. J. Ruiz Mondragón, «Efecto de la Profundidad sobre la Soldabilidad de Aceros Ferríticos en Ambientes Simulados Unidos por Soldadura Húmeda,» *Soldagem & Inspeção*, vol. 21, n° 2, pp. 126-136, 2016.
- [9] J. Tomków, D. Fydrych y K. Wilk, «Effect of Electrode Waterproof Coating on Quality of Underwater Wet Welded Joints» *Materials*, vol. 13, n° 13, p. 2947, 2020.
- [10] P. H. Ribeiro Menezes, E. C. Pereira Pessoa y A. Queiroz Bracarense, «Comparison of underwater wet welding performed with silicate and polymer agglomerated electrodes» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 266, pp. 63-72, 2019.
- [11] V. Vashishtha, R. Wattal, S. Pandey y N. Bhaduria, «Problems encountered in underwater welding and remedies- a review» de *Materials Today: Proceedings*, 2022.
- [12] «Fundamental Difficulties Associated With Underwater Wet Welding» *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 4, n° 6 (Version 4), pp. 26-31, 2014.
- [13] V. A. Hosseini, M. A. Valiente Bermejo y J. Gårdstam, «Influence of multiple thermal cycles on microstructure of heat-affected zone in TIG-welded super duplex stainless steel» *Welding in the World*, vol. 60, pp. 233-245, 2016.
- [14] E. C. P. Pessoa, A. Q. Bracarense, V. R. Dos Santos, R. R. Marinho, H. L. Assunção y F. C. Rizzo, «Post Underwater Wet Welding Heat Treatment by Underwater Wet Induction Heating» *Welding Journal*, vol. 100, pp. 229-238, 2021.
- [15] W. Bolton, *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Un enfoque multidisciplinario.*, México: Alfaomega, 2013.

- [16] L. R.-H. , J. E. T.-G. , J. A. O.-A. Á. A. V. J. H. López-Botero, «Aplicación de LabVIEW como instrumento virtual en mediciones de campo magnético (gaussímetro),» *Revista Colombiana de Física*, vol. 37, n° 1, pp. 195-198, 2005.
- [17] F. J. B. S. L. T. Sergio Gallardo, «Virtual instrumentation laboratory based on LabVIEW. A case study: A DSPs course» de *international conference on engineering and computer education*, 2005.
- [18] R. P. Areny, *Sensores y acondicionadores de señal*, Barcelona, España: Marcombo S.A, 1998.
- [19] L. T. Orta, «Consideraciones para la obtención de procedimientos a emplear en la soldadura bajo agua mojada confiable.,» UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS, Santa Clara, Cuba, 2011.
- [20] J. Industrial, «SENSORES DE TEMPERATURA,» JM Industrial, 14 07 2021. [En línea]. Available: <https://www.jmi.com.mx/literatura/literatura-sensores-temperatura.html>. [Último acceso: 14 07 2021].
- [21] C. J. Revoredo Santande, «Modelación de ciclos térmicos en la soldadura subacuática mojada,» Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 2010.
- [22] R. R. Ambriz, G. Barrera, R. García y V. H. López, «Efecto de los ciclos térmicos de soldadura por arco eléctrico indirecto modificado (AEIM) en las propiedades mecánicas de la aleación AA6061-T6,» *REVISTA DE METALURGIA*, vol. 45, n° 1, pp. 42-51, 2009.
- [23] H. Laurila, «compensacion-de-la-union-fria-referencia-del-termopar,» Beamex, 12 03 2020. [En línea]. Available: <https://blog.beamex.com/es/compensacion-de-la-union-fria-referencia-del-termopar>. [Último acceso: 14 07 2021].
- [24] Centro Español de Metrología, *Procedimiento TH-003 para la calibración por comparación de termopares*, España: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Edición digital 1, 2008.
- [25] D. C. Montgomery, *Diseño y análisis*, México: EDITORIAL LIMUSA, S.A, 2004.