Fecha de envío:

RECONVERSIÓN TECNOLÓGICA DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA DE UNA MÁQUINA BLOQUEADORA DE LENTES OFTÁLMICAS

TECHNOLOGICAL RECONVERSION OF THE TEMPERATURE CONTROL SYSTEM OF AN OPHALMIC LENS BLOCKING MACHINE

Hernandez L. José L.* Montaña Q. Henry**

Resumen*:* En el laboratorio oftálmico de la empresa SERVILENTES LTDA de Bogotá, se realizó una intervención a una máquina bloqueadora de lentes oftálmicas. La etapa de bloqueo de lentes es imprescindible en el proceso de fabricación de lentes oftálmicas, esta consiste en unir la lente base a una pieza de soporte que permita el acoplamiento de la misma a las demás máquinas del proceso; esta operación se realiza desde una máquina que inyecta una aleación de bajo punto de fusión. La máquina intervenida estaba constituida por un sistema de control de temperatura que presentaba graves problemas en su funcionamiento, teniendo como causa principal la avería de sus circuitos de control.

En este proyecto se ejecutó la reconversión tecnológica del sistema de control de temperatura de la máquina bloqueadora. Para esto, se implementó un sistema de control de temperatura de lazo cerrado ON/OFF utilizando como controlador la tarjeta de desarrollo de prototipos PSoC 5LP e integrando 7 sensores de temperatura de 3 tipos diferentes: el sensor de temperatura resistivo PT100, 4 termocuplas tipo J y 2 sensores LM35 para la compensación de la unión fría.

Con este nuevo sistema de control de temperatura el tanque y los inyectores de la maquina conservan con la estabilidad requerida la temperatura de trabajo y por tanto se garantiza el

* Estudiante de Tecnología en Electrónica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
Correo electrónico: joslhernandezl@correo.udistrital.edu.co
** Docente del Proyecto Curricular de Tecnología en Electrónica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Correo electrónico : hmontana@gmail.com

correcto funcionamiento de la máquina. Con la implementación de este trabajo, se ha logrado alargar la vida útil de la máquina intervenida y aumentar la capacidad de la etapa de bloqueo.
Palabras clave: Control de temperatura, Sensores de temperatura, Instrumentación, Microcontroladores, Máquina bloqueadora de lentes oftálmicas.
Abstract: In the ophthalmic laboratory of the company SERVILENTES LTDA of Bogotá, an intervention was performed on an ophthalmic lens blocking machine. The lens locking stage is essential in the ophthalmic lens manufacturing process; this consists of joining the base lens to a support piece that allows it to be attached to the other machines in the process. This operation is performed from a machine that injects a low melting point alloy. The intervened machine was constituted by a temperature control system that presented serious problems in its operation, having as its main cause the breakdown of its control circuits.

In this project the technological reconversion of the temperature control system of the blocking machine was executed. For this, a closed loop ON / OFF temperature control system was implemented using as a controller the PSoC 5LP prototype development card and integrating 7 temperature sensors of 3 different types: the PT100 resistive temperature sensor, 4 type J thermocouples and 2 LM35 sensors for cold junction compensation.

With this new temperature control system, the tank and the injectors of the machine keep the working temperature with the required stability and therefore the correct operation of the machine is guaranteed. With the implementation of this work, it has been possible to extend the useful life of the intervened machine and increase the capacity of the blocking stage.
Key Words: Temperature control, Temperature sensors, Instrumentation, Microcontrollers, Ophthalmic lens blocking machine.

Fecha de envío:

1. Introducción

La máquina bloqueadora de lentes perteneciente al laboratorio oftálmico de la empresa SERVILENTES LTDA, de referencia Satisloh Alloy Blocker 2000 presentaba insuficiencias de gravedad en su funcionamiento. Debido a una incorrecta operación, la tarjeta de control sufrió daños irreparables, lo cual desencadenó una falla en los mandos de calefacción, en el control de la temperatura y en los calentadores de los inyectores.

A causa de estos antecedentes, la maquina presentaba dos problemas principales. Por un lado, un control de temperatura provisional de lazo abierto que no garantizaba el control adecuado de la temperatura del tanque de alloy, lo que causaba un alto riesgo de daño en el polímero de la lente base y por tanto implicaba reemplazar la lente por una nueva, generando un gasto extra de lentes base. Y por otro lado, los inyectores presentaban constante taponamiento a falta de calentadores, lo que dificultaba la operación de bloqueo y demostraba en la máquina un bajo rendimiento.

La etapa de bloqueo es indispensable en el proceso de fabricación de lentes oftálmicas, esta etapa garantiza que la lente pueda ser trabajada en cada una de las etapas siguientes del proceso. Debido a los problemas mencionados, fue necesario intervenir la máquina bloqueadora por medio de la reconversión tecnológica de su sistema de control de temperatura. La intervención realizada fue oportuna para presentar una nueva aplicación del microcontrolador de bajo costo, en este caso de la tarjeta de desarrollo de prototipos PSoC 5LP, en los sistemas de control industriales y como una solución eficiente gracias a sus características de alta precisión y exactitud. Este trabajo permite mantener vigente la máquina bloqueadora LOH Alloy Blocker 2000 al garantizar su correcto funcionamiento y evitar su desaprovechamiento. De igual forma, con el proyecto se prevendrá el gasto extra de insumos (en este caso las lentes base y el polímero de encintado), aumentará la capacidad de trabajo de la etapa de bloqueo y se garantizará la calidad de las lentes para las etapas posteriores.

De esta manera, el desempeño de la etapa de bloqueo mejorará en el laboratorio oftálmico de la empresa SERVILENTES LTDA.

El trabajo presentado buscó reconvertir tecnológicamente el sistema de control de temperatura de la máquina bloqueadora de lentes oftálmicas Alloy Blocker 2000 para la empresa SERVILENTES LTDA. Para esto se requirió rediseñar el sistema de control de temperatura tanto de los inyectores como del tanque de alloy de la máquina en mención. Adicionalmente, se implementó un sistema de monitoreo de temperatura en las estaciones de bloqueo y se renovaron los dispositivos de mando y visualización.

2. Máquina bloqueadora de alloy

La máquina bloqueadora de lentes permite unir la lente base con la pieza de bloqueo. Aunque ya existen otras alternativas, generalmente se utiliza una aleación de bajo punto de fusión (alloy) para lograr la operación de bloqueo. Existen distintos modelos de máquinas bloqueadoras, la máquina intervenida presenta dos estaciones de bloqueo, como se muestra en la Figura 1(10) [1].

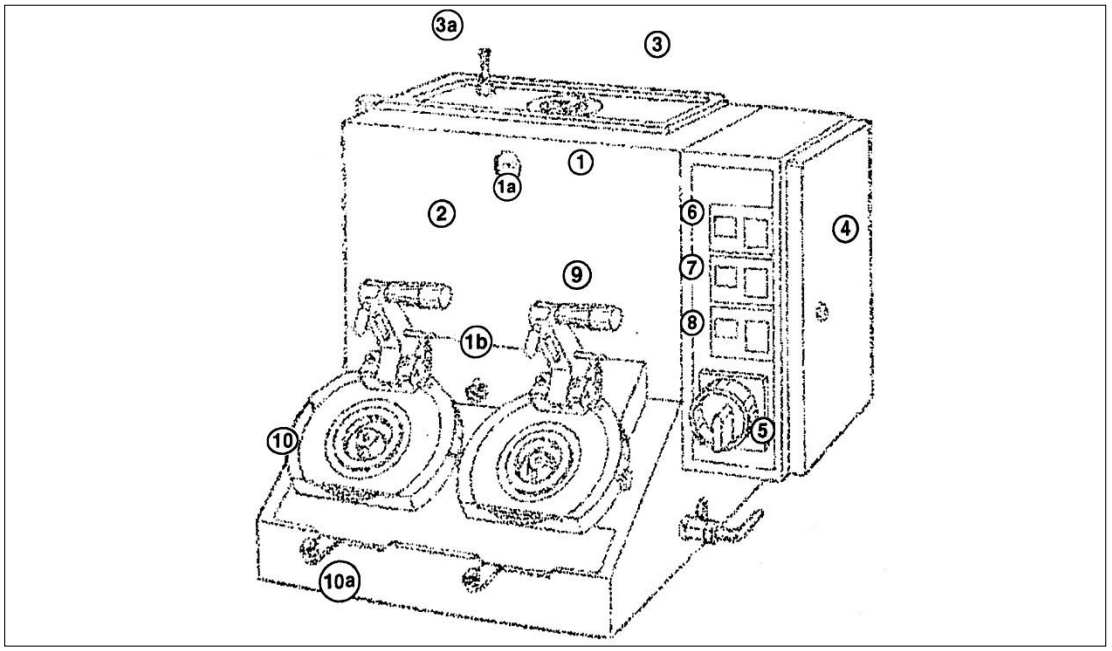


Figura 1. Vista general de la máquina bloqueadora LOH Alloy Blocker 2000 [1].

Funcionamiento

En la operación de bloqueo se debe seleccionar una combinación correcta de la lente, el anillo de bloqueo y la pieza de bloqueo, como se muestra en la figura 2. Para que la lente quede adherida a la pieza de bloqueo, el anillo de bloqueo funciona como molde para el alloy.

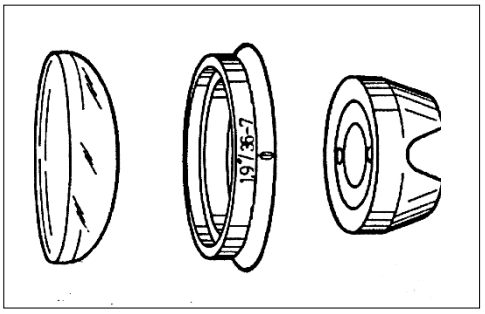


Figura 2. Lente, anillo de bloqueo y pieza de bloqueo [1].

Las estaciones de bloqueo en una máquina bloqueadora, son las plataformas donde se realiza la operación de bloqueo, están conformadas por una placa refrigerada con un espacio para introducir la pieza de soporte. En el centro del espacio se ubica el inyector de alloy, como se muestra en la Figura 3(a). Para bloquear una lente se realizan 5 operaciones: Se introduce el cuerpo de soporte (Figura 3(a)), se acopla el anillo de bloqueo (Figura 3(b)), se deposita la lente sobre el anillo de bloqueo (Figura 3(c)), se fija la lente con el dispositivo de fijación manual (Figura 3(d)) y se acciona la palanca de la válvula de paso para inyectar el alloy (Figura 3(e)).

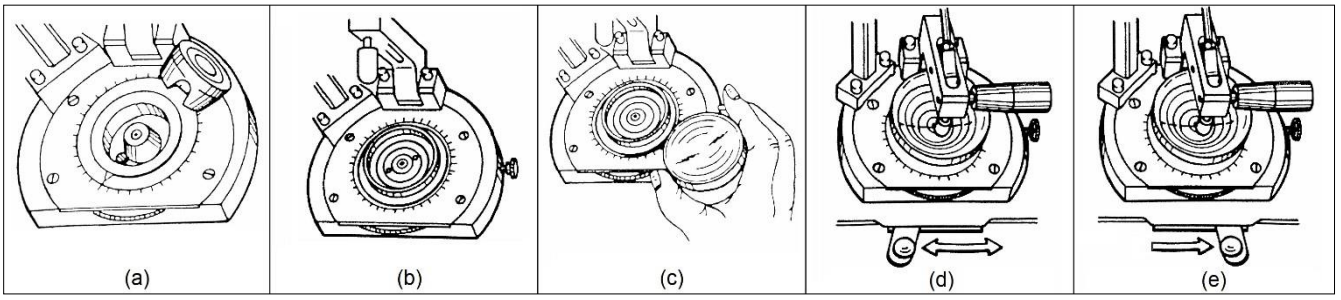


Figura 3. Operaciones en la estación de bloqueo. (a): Colocación de pieza de bloqueo. (b): Colocación de anillo de bloqueo. (c): Colocación de la lente. (d): Fijación de la lente. (e): Llenado con alloy [1].

La temperatura de trabajo de la calefacción del tanque de alloy y los inyectores depende del tipo de alloy:

Punto de fusión del alloy	Temperatura de trabajo recomendada (en °C)
47	50 – 52
56	60 – 62
76	80 – 82

Tabla 1. Temperatura de trabajo en función del punto de fusión del alloy [1].

3. Metodología

En el diagrama de bloques que se muestra en la figura 4 se presenta la metodología con la cual se llevó a cabo el proyecto. A continuación se presenta el desarrollo de cada uno de los pasos.

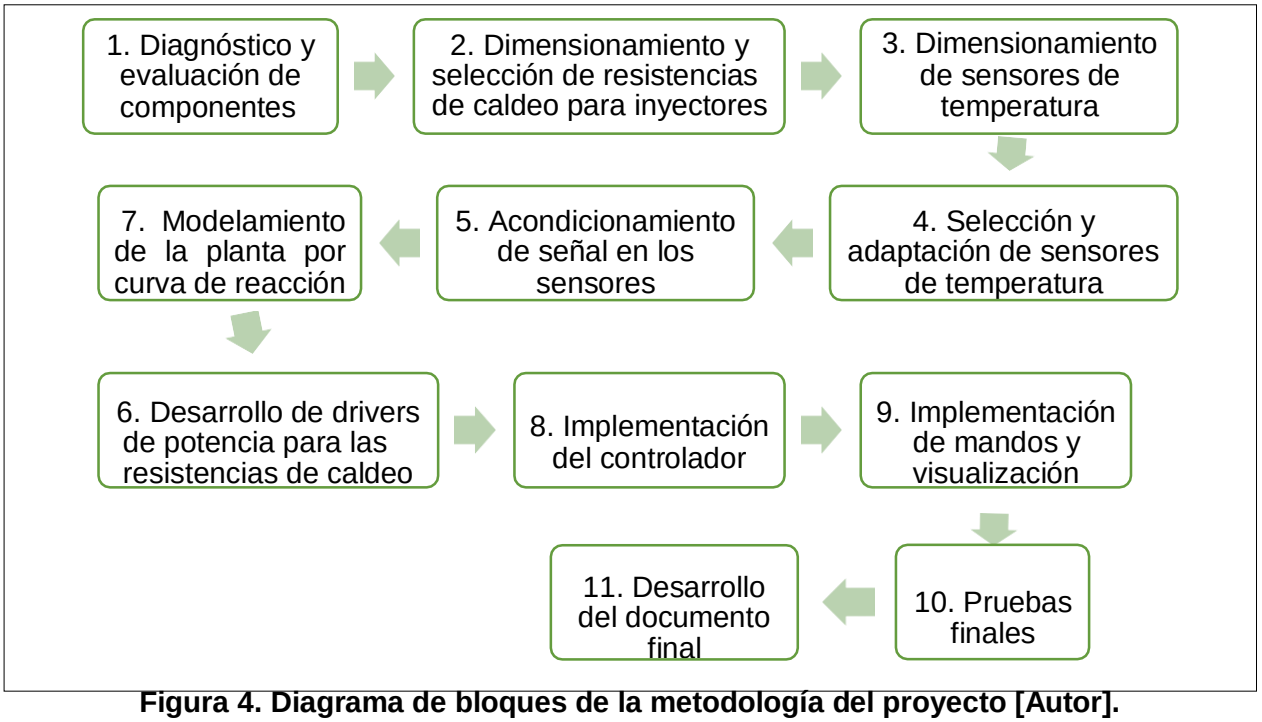


Figura 4. Diagrama de bloques de la metodología del proyecto [Autor].

Diagnóstico y evaluación de componentes

Sensores de temperatura

Para el tanque de alloy se encontró un sensor de temperatura PT100 que presenta buen estado y funciona correctamente. Para los inyectores no se encontraron instalados los sensores de temperatura.

Tarjeta de control

En la tarjeta de control original se encontraron 2 circuitos de regulación dual, de ± 5V y ± 12V que funcionan correctamente. El primero alimenta los circuitos de visualización, el segundo alimenta los tres circuitos discretos que se encargan de controlar la temperatura del tanque de alloy y los dos inyectores, respectivamente, a través de la activación de 4 relés de estado sólido. Adicionalmente, los tres circuitos en mención envían una señal a los circuitos de visualización para lograr así el monitoreo de la temperatura.

El circuito original del tanque está diseñado para recibir la señal de un RTD PT100 y los circuitos originales de los inyectores están diseñados para recibir la señal de la termocupla tipo J como se muestra en la figura 5.



Figura 5. Entradas de los sensores de temperatura en la tarjeta de control original [Autor].

El monitoreo y la visualización de la temperatura medida del tanque de alloy funciona correctamente. Se comprobó la temperatura monitoreada utilizando un multímetro con termocupla. Al conectar una termocupla tipo J en las entradas de los sensores de los inyectores, se comprobó que el monitoreo y la visualización de la temperatura medida para

los inyectores también funciona correctamente. Sin embargo, se detectó falla de control en los tres circuitos de control de temperatura, no se detectó pulso de control para activar los relés de estado sólido. De igual manera, se encontró falla en el funcionamiento de los 4 relés de estado sólido originales; 2 de referencia S202SE2 para la calefacción de los inyectores y 2 de referencia S216SE2 para la calefacción del tanque. Por último se detectó el rastro de un corto circuito en la salida de alimentación del calentador del tanque; uno de los terminales de la bornera correspondiente presenta una quemadura y el tornillo se encuentra derretido. Adicionalmente, a unos milímetros de distancia se encontró un tramo de la pista de cobre quemado correspondiente a la tierra de la alimentación, como lo muestra la figura 6.



Figura 6. Daños encontrados en la tarjeta de control original [Autor].

Mandos y Visualización

El sistema de visualización original consta de 3 displays de 7 segmentos de 2 dígitos para visualizar la temperatura medida de cada calentador. También cuenta con 3 pares de LED como testigos para indicar si el sensor está conectado (LED verde encendido) o si el sensor está desconectado o roto (LED rojo encendido). Se encontró un correcto funcionamiento en los circuitos de visualización. Cada display de 7 segmentos funciona correctamente. Se encontraron 3 dispositivos selectores, los cuales basan su funcionamiento en una configuración de resistencias; cada dispositivo selector cambia el valor de la resistencia en función de la temperatura deseada. Estos selectores conectaban con comparadores de cada circuito de control. Sólo uno de los dispositivos conservaba en buen estado sus botones.

En la figura 7 (a) se muestra el sistema de mando y visualización descrito y en la figura 7 (b) se muestra el dispositivo selector de buen estado con más detalle.

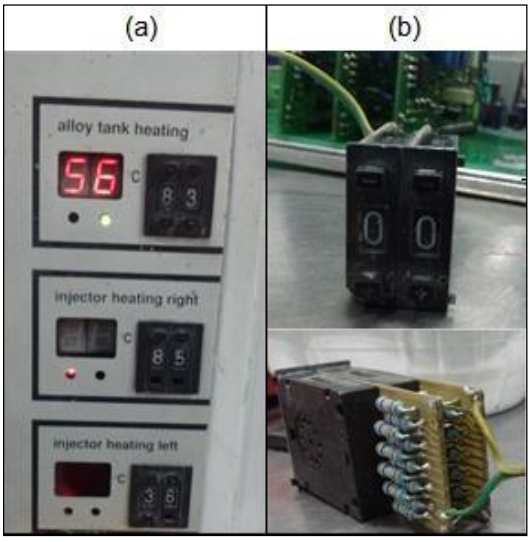


Figura 7. (a): Dispositivo de mando y visualización de temperatura. (b): Selector de temperatura y las resistencias que lo conforman [Autor].

Calentadores

El calentador del tanque presenta buen estado y funciona correctamente. Por otro lado, se encontró que los inyectores no cuentan con sus respectivos calentadores.

Limpieza general de la máquina

Dentro del procedimiento se realizó una limpieza con desengrasante industrial de las partes mecánicas de las plataformas y los inyectores y del tanque de la máquina. En la figura 8 se presenta el registro fotográfico de algunas de las piezas que se limpiaron.

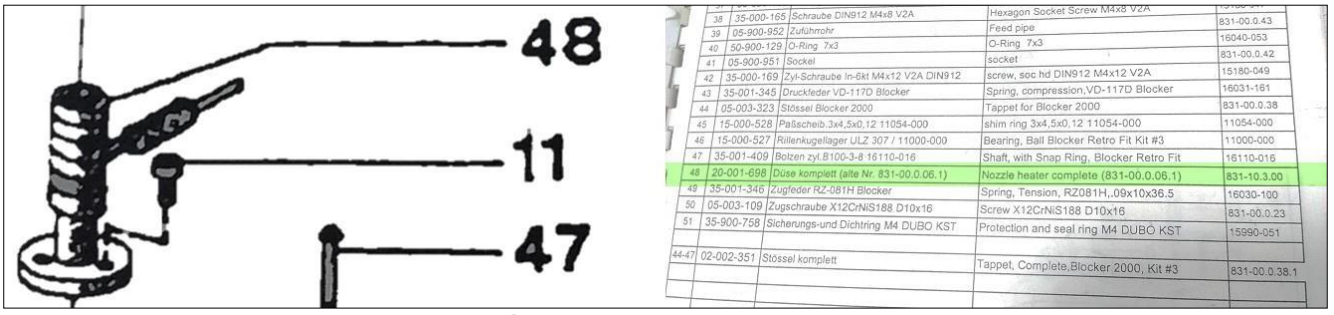


Figura 8. Registro fotográfico de la limpieza general de la máquina [Autor].

Dimensionamiento y selección de resistencias de caldeo para los inyectores

Identificación del calentador

Debido a la ausencia de los calentadores en los inyectores, se consultó el manual de funcionamiento de la máquina y se identificó el tipo de calentador que requieren los inyectores. En la figura 9 se puede observar la representación del calentador y la identificación del mismo en el listado de componentes del manual de la máquina.



38	35-000-165	Schraube DIN912 M4x8 V2A	Hexagon Socket Screw M4x8 V2A	831-00.0.43
39	05-900-952	Zuführohr	Feed pipe	16040-053
40	50-900-129	O-Ring 7x3	O-Ring 7x3	831-00.0.42
41	05-900-951	Sockel	socket	15180-049
42	35-000-169	Zyl-Schraube In-6kt M4x12 V2A DIN912	screw, soc hd DIN912 M4x12 V2A	16031-161
43	35-001-345	Druckfeder VD-117D Blocker	Spring, compression,VD-117D Blocker	831-00.0.38
44	05-003-323	Stössel Blocker 2000	Tappet for Blocker 2000	11054-000
45	15-000-528	Paßscheib.3x4,5x0,12 11054-000	shim ring 3x4,5x0,12 11054-000	11000-000
46	15-000-527	Rillenkugellager ULZ 307 / 11000-000	Bearing, Ball Blocker Retro Fit Kit #3	16110-016
47	35-001-409	Bolzen zyl.B100-3-8 16110-016	Shaft, with Snap Ring, Blocker Retro Fit	831-10.3.00
48	20-001-698	Düse komplett (alte Nr. 831-00.0.06.1)	Nozzle heater complete (831-00.0.06.1)	16030-100
49	35-001-346	Zugfeder RZ-081H Blocker	Spring, Tension, RZ081H,.09x10x36.5	831-00.0.23
50	05-003-109	Zugschraube X12CrNiS188 D10x16	Screw X12CrNiS188 D10x16	15990-051
51	35-900-758	Sicherungs-und Dichtring M4 DUBO KST	Protection and seal ring M4 DUBO KST	
44-47	02-002-351	Stössel komplett	Tappet, Complete,Blocker 2000, Kit #3	831-00.0.38.1

Figura 9. Descripción del componente: Nozzle Heater Complete (Calentador de boquilla completo) [2].

Tipificación, búsqueda y adquisición del calentador

Existen distintos tipos de calentadores de boquilla; los inyectores de la máquina bloqueadora trabajada requieren un calentador de boquilla tipo microtubular.

Se realizó la búsqueda de este calentador vía internet y en las zonas del centro de Bogotá que fabrican resistencias eléctricas. Los sitios que comercializan resistencias eléctricas en el centro de Bogotá no manejan este tipo de calentador, ni tampoco un diámetro tan pequeño (1 cm).

Por vía internet se logró encontrar una empresa en Bogotá que fabrica y/o importa resistencias eléctricas de todo tipo, incluyendo los calentadores microtubulares. En la figura 10 se muestran los calentadores adquiridos.



Figura 10. Calentadores de boquilla adquiridos [Autor].

Dimensionamiento de sensores de temperatura

Sensores de los inyectores: Como se identificó en el diagnóstico y evaluación de componentes, los circuitos de control de los inyectores fueron diseñados para el uso de la termocupla tipo J (Ver Figura 5).

Sensores de las plataformas: Debido a la gran adaptabilidad de las termocuplas, se determinó utilizar este tipo de sensor de tal manera que la unión de cada sensor pueda adecuarse convenientemente a las plataformas de bloqueo.

Selección y adaptación de sensores de temperatura

Sensores de los inyectores

Los sensores de los inyectores son termocuplas tipo J que se encuentran adaptadas a los calentadores de boquilla adquiridos. En la figura 10 se pueden observar los calentadores adquiridos con sus cables de alimentación y los cables rojo y azul de la termocupla adaptada. En consecuencia, la adaptación de los sensores en los inyectores se logró a partir de la adaptación de los calentadores, como se observa en la figura 11.

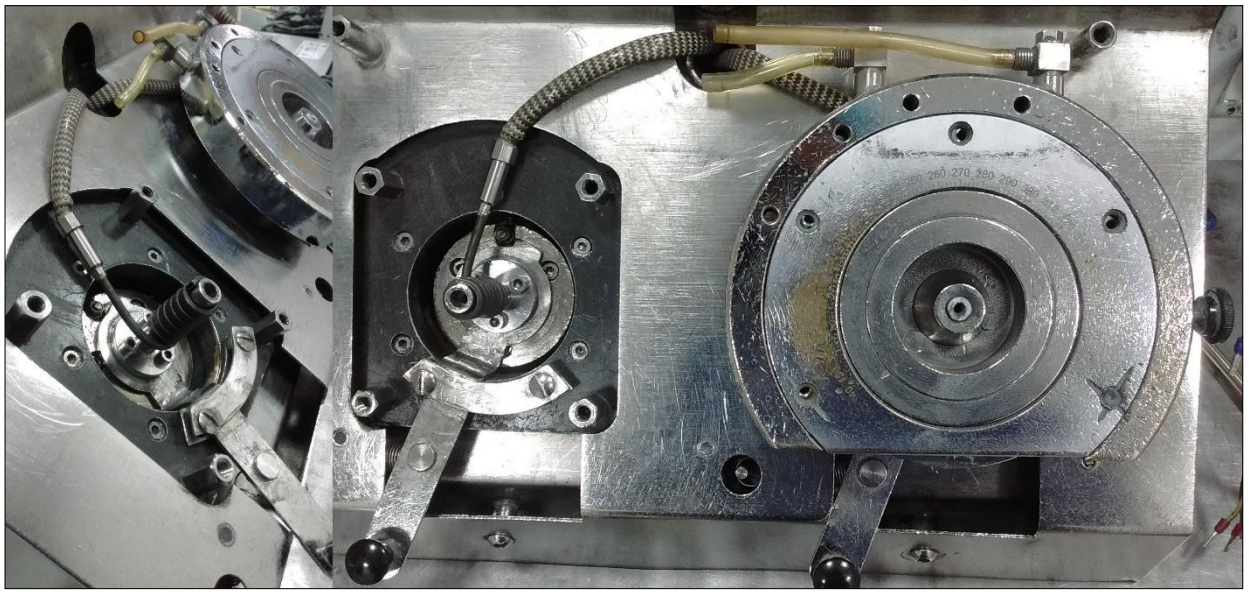


Figura 11. Adaptación de calentadores a los inyectores de la máquina bloqueadora [Autor].

5.4.1. Sensores de las plataformas

El sensor seleccionado para monitorear la temperatura de las plataformas es la termocupla tipo J. Estos se mandaron a fabricar con terminal de ojo de 5mm de diámetro, como lo muestra la figura 12.

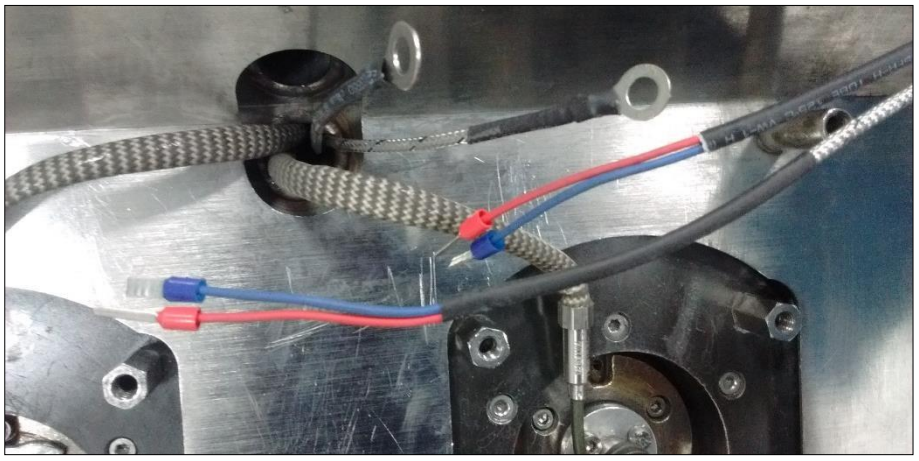


Figura 12. Termocuplas tipo J con terminal de ojo adquiridas para monitorear la temperatura de las plataformas [Autor].

De esta manera, el terminal de ojo del sensor encaja en el tornillo que ajusta cada dispositivo manual de fijación con la plataforma de bloqueo, como se observa en la figura 13. Para balancear la instalación, se dispusieron arandelas en los otros tornillos.

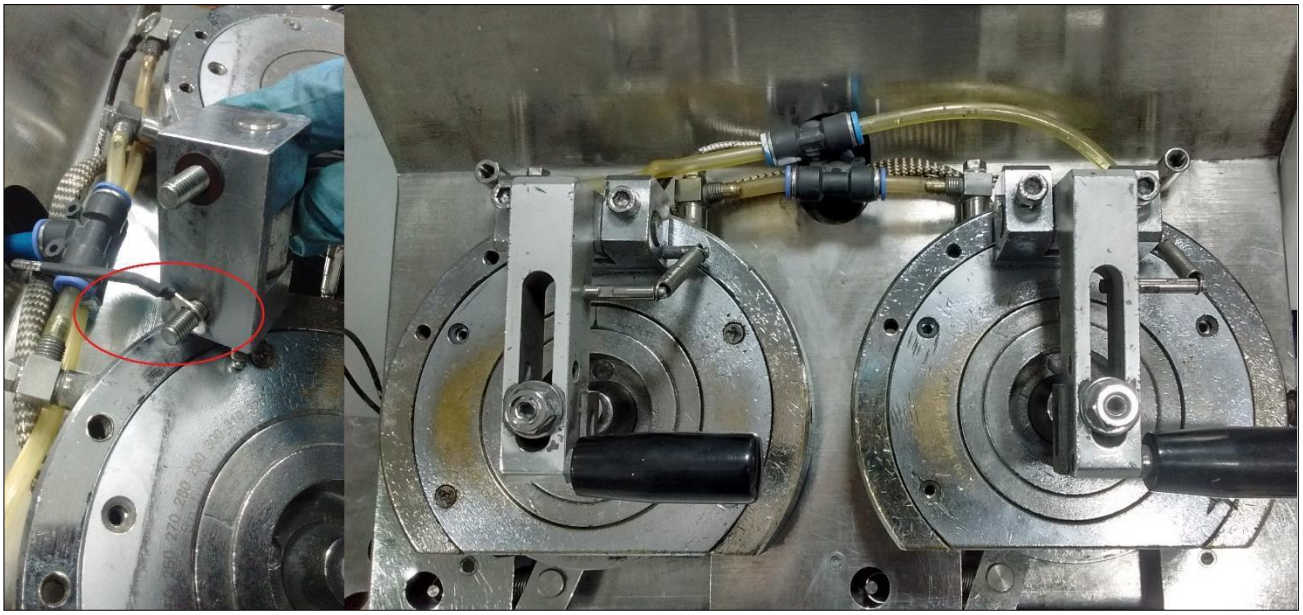


Figura 13. Adaptación de los sensores a las plataformas [Autor].

Acondicionamiento de señal de los sensores

Acondicionamiento de las termocuplas

Lectura del ADC: La termocupla tipo J, utilizada para la medición de temperatura en los inyectores y las plataformas de la máquina bloqueadora, produce un pequeño cambio en el voltaje por cambio de temperatura (aproximadamente 52 µV/°C) [2]. De acuerdo con la documentación del fabricante de la tarjeta de desarrollo de prototipos PSoC 5LP, el Conversor Análogo – Digital (ADC) Delta Sigma de este dispositivo tiene la precisión y exactitud requeridas para medir la temperatura utilizando la termocupla sin necesidad de amplificadores externos [3][4]. El ADC Delta Sigma del PSoC 5LP puede ser configurado en un rango de ± 0.064V con 20 bits de resolución [3][4][5].

De acuerdo con las tablas del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología NIST, a -210 °C, la termocupla tipo J proporciona una tensión de salida de -8.095 mV [2]. Debido a que los dispositivos PSoC son de alimentación simple, se deben mantener los voltajes en los pines de entrada por encima de 0V. Para lograr esto, se agregaron resistencias externas a la entrada negativa de cada termocupla para agregar una pequeña polarización de 16 mV [3][4].

En la figura 14 se presenta el circuito de interfaz base con el cual se realizó la lectura de voltaje a través de la tarjeta de desarrollo PSoC 5LP y con el cual se realizó el modelamiento del comportamiento de cada termocupla.

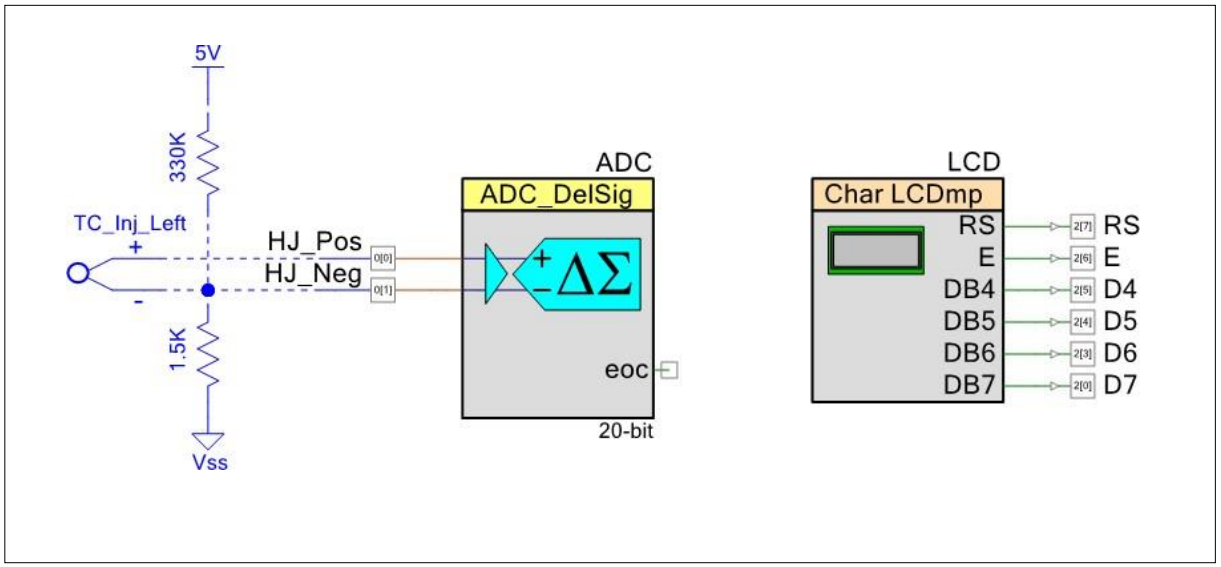


Figura 14. Circuito de interfaz base para la lectura de voltaje de la termocupla [Autor].

Detección de termocupla rota: Si bien el rango de temperaturas de los inyectores y las plataformas no comprende temperaturas bajo cero, esta configuración de resistencias es útil para detectar si un cable de la termocupla se rompe. Si el cable de la termocupla se rompe, el pequeño voltaje aplicado al terminal negativo del conector de la termocupla lleva la lectura del ADC a un valor negativo grande. Al verificar el ADC para un valor negativo grande (menor a –10 mV) se detecta una conexión de termocupla rota [3][4].

Compensación de unión fría: Si la temperatura de la unión fría no es igual a 0 °C, la unión fría también desarrollará un voltaje, reduciendo el voltaje medido. Para medir adecuadamente la temperatura de la unión caliente, se debe medir la temperatura de la unión fría y el voltaje correspondiente debe agregarse al voltaje medido, este procedimiento se le conoce como compensación de unión fría [3][4]. Por facilidad de operación, se utilizó el sensor de temperatura LM35 para la compensación de unión fría. El LM35 se conectó primero a un amplificador operacional interno configurado como seguidor de voltaje para garantizar un

acople de impedancias adecuado [4][6]. En la figura 15 se muestra el circuito de interfaz definitivo para la medición de temperatura con las termocuplas.

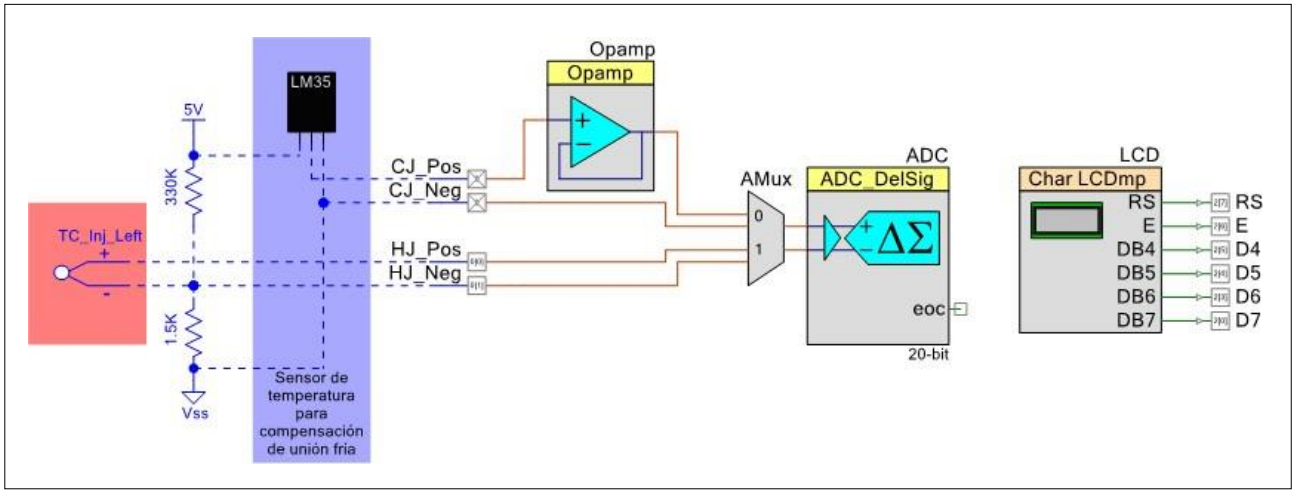


Figura 15. Circuito de interfaz para la medición de temperatura con una termocupla [Autor].

Acondicionamiento del sensor PT100 del tanque de alloy

Para acondicionar la señal del RTD PT100 se programó una corriente de 1 mA a través del IDAC del dispositivo PSoC 5LP de manera que la corriente proporcionada al RTD genere un voltaje [7][8][9]. Para evitar posibles errores de ganancia / compensación causados por el ADC y el IDAC, se hizo uso de una resistencia de referencia, de acuerdo a las notas de aplicación del fabricante del PSoC 5LP [7][8]. En la figura 16 se muestra el esquema del circuito de interfaz para la medición de temperatura con el sensor resistivo PT100.

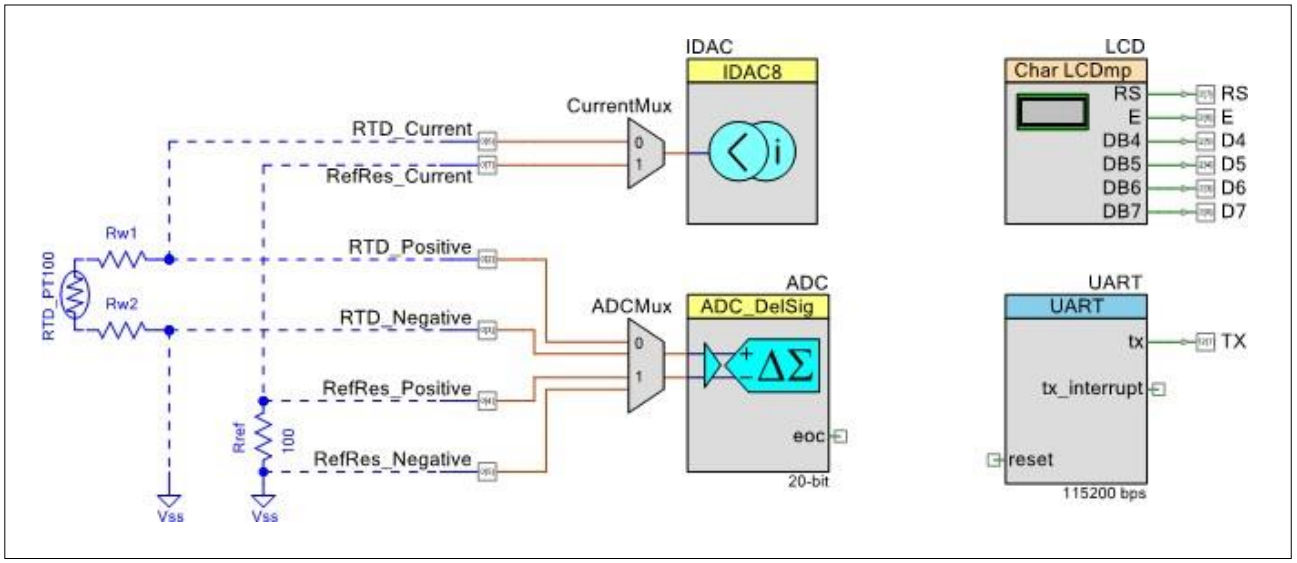


Figura 16. Circuito de interfaz para la medición de temperatura con un PT100 [Autor].

El bloque UART permite la visualización de las mediciones por comunicación serial y el bloque LCD permite la visualización de las mediciones por display LCD alfanumérico.

Desarrollo de drivers de potencia para las resistencias de caldeo

Selección de dispositivo de potencia: Para la activación de los calentadores se seleccionó el relé de estado sólido (SSR) monofásico de referencia MS-1DA4825. De acuerdo con sus características de respuesta rápida y robusta, sin ruido durante la operación y con circuito amortiguador RC Snubber incorporado, es un dispositivo apropiado como driver de potencia. El dispositivo se activa al aplicar un voltaje de control de 3 – 32 V DC en las entradas 3 - 4 y admite una corriente de control entre 3 – 25 mA. En la figura 17 se muestra el esquema circuital del SSR con sus respectivas entradas y salidas [10].

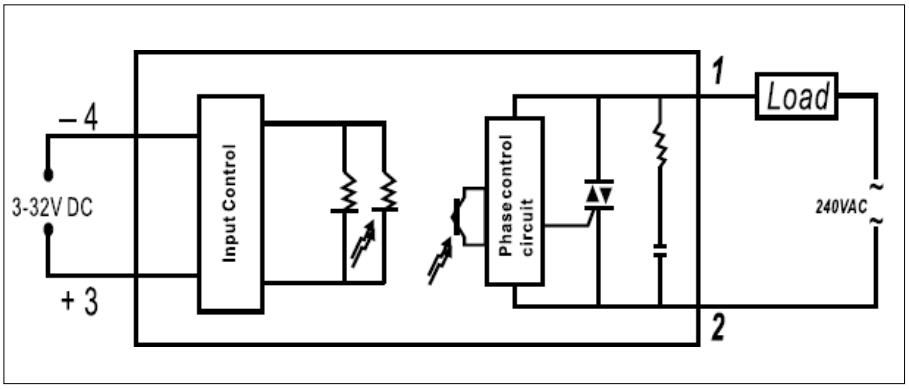


Figura 17. Esquema circuital del SSR MS-1DA4825 [4].

Prueba de activación de SSRs con microcontrolador: Se adquirieron 3 SSR para la activación de las 3 resistencias calentadoras. Se realizó una prueba de funcionamiento de los dispositivos adquiridos aplicando pulsos de voltaje a través del dispositivo PSoC 5LP para su activación y de esta manera abrir o cerrar un circuito con un bombillo incandescente, como se muestra en la figura 18.

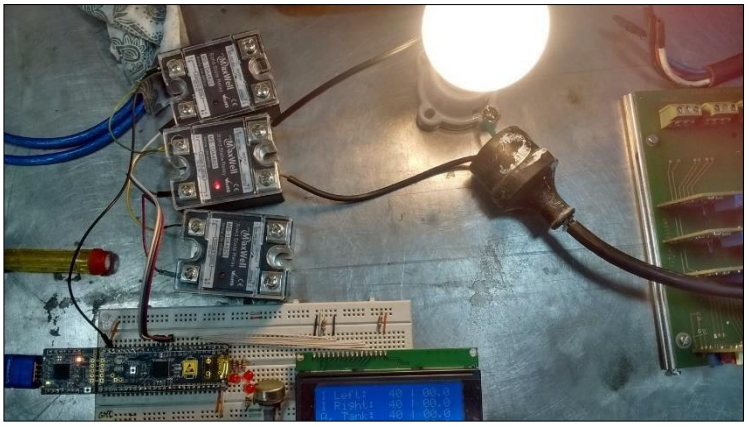


Figura 18. Prueba de funcionamiento de los SSR MS-1DA4825 [Autor].

Modelamiento de la planta por curva de reacción

Para desarrollar una correcta medición de la temperatura a través de la tarjeta de desarrollo de prototipos PSoC 5LP, se registró el comportamiento de cada uno de los sensores utilizados. Para cada sensor, tanto termocuplas como RTD, se adquirieron los datos de voltaje versus temperatura, los datos de temperatura se obtuvieron con la ayuda de un multímetro con termocupla, como lo muestra la figura 19.

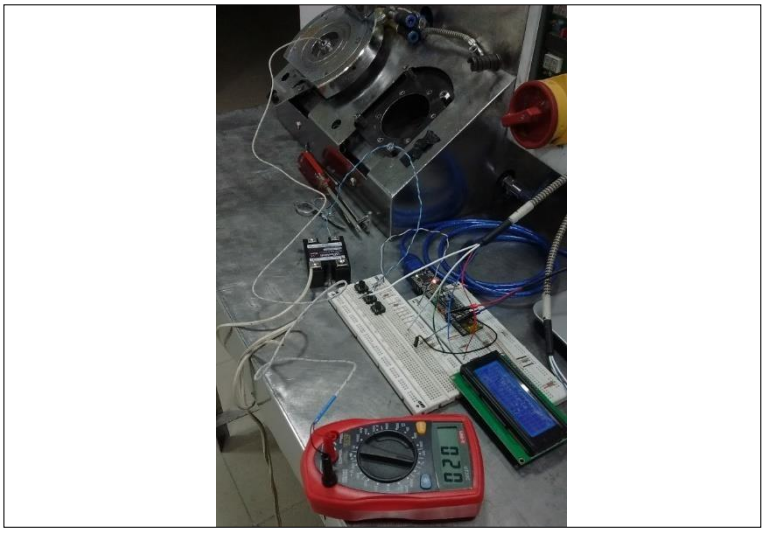


Figura 19. Registro de datos de voltaje vs temperatura en el inyector izquierdo [Autor].

Para el modelamiento de las termocuplas también se registró la temperatura de la unión fría. Los datos registrados se graficaron en Excel y, para cada sensor, se halló la ecuación de regresión lineal que modela su comportamiento, y el coeficiente de determinación R^2, como se presenta a continuación.

Termocupla del inyector izquierdo

Rango de temperatura medido: 20 –

66 °C **Temperatura de unión fría:** 22

°C

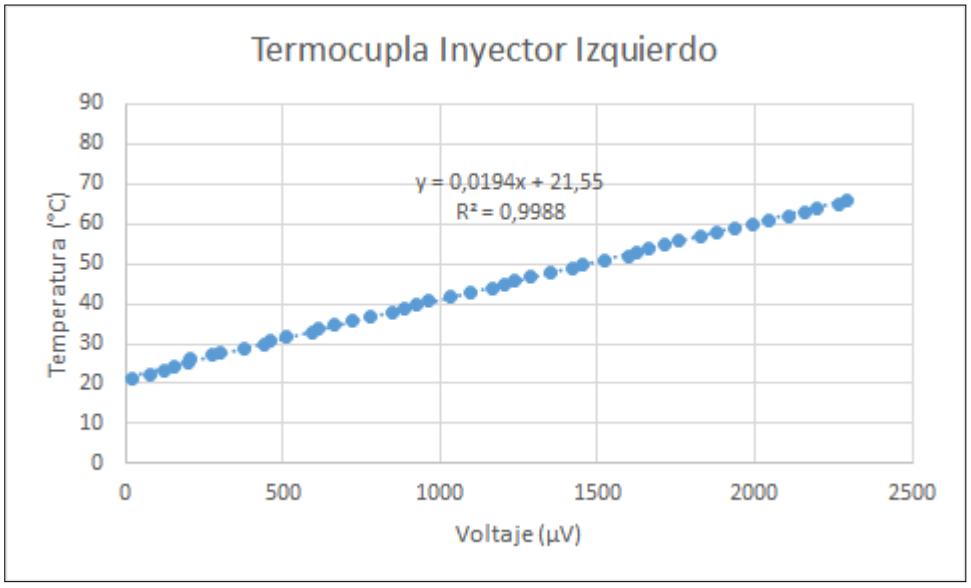


Figura 20. Voltaje vs temperatura para termocupla del inyector izquierdo [Autor].

Termocupla del inyector derecho

Rango de temperatura medido: 20 –

92 °C **Temperatura de unión fría:** 22

°C

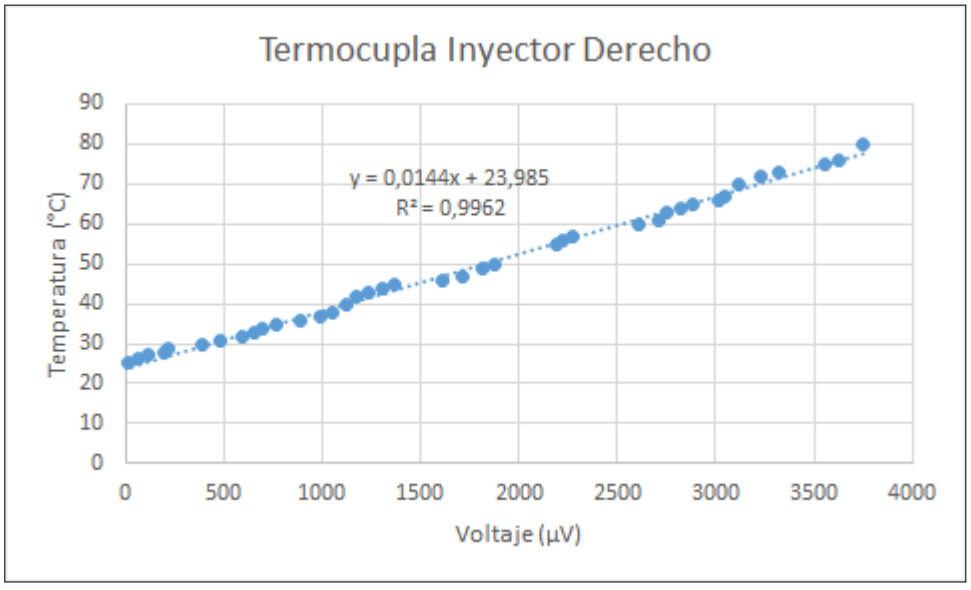


Figura 21. Voltaje vs temperatura para termocupla del inyector derecho [Autor].

Termocupla de la plataforma izquierda

Rango de temperatura medido: 18 –

87 °C **Temperatura de unión fría:** 21 °C

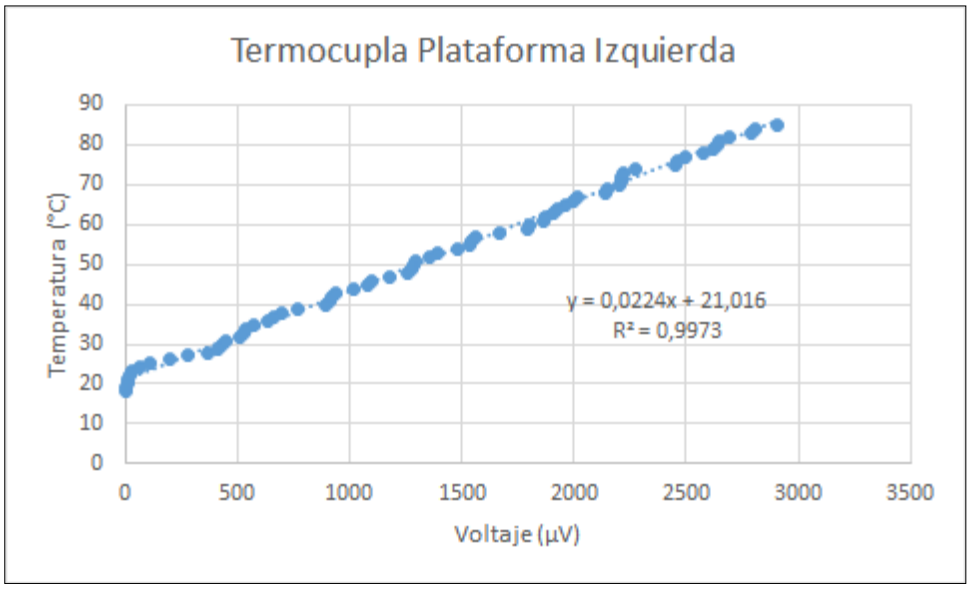


Figura 22. Voltaje vs temperatura para termocupla de la plataforma izquierda [Autor].

Termocupla de la plataforma derecha

Rango de temperatura medido: 19 –

85 °C **Temperatura de unión fría:** 20 °C

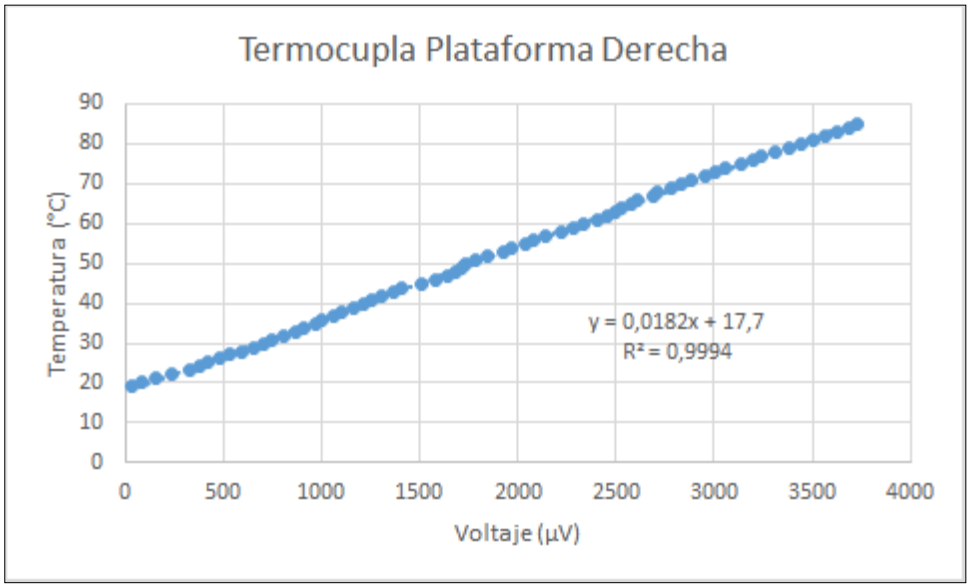


Figura 23. Voltaje vs temperatura para termocupla de la plataforma izquierda [Autor].

RTD del tanque

Rango de temperatura medido: 24 – 84 °C

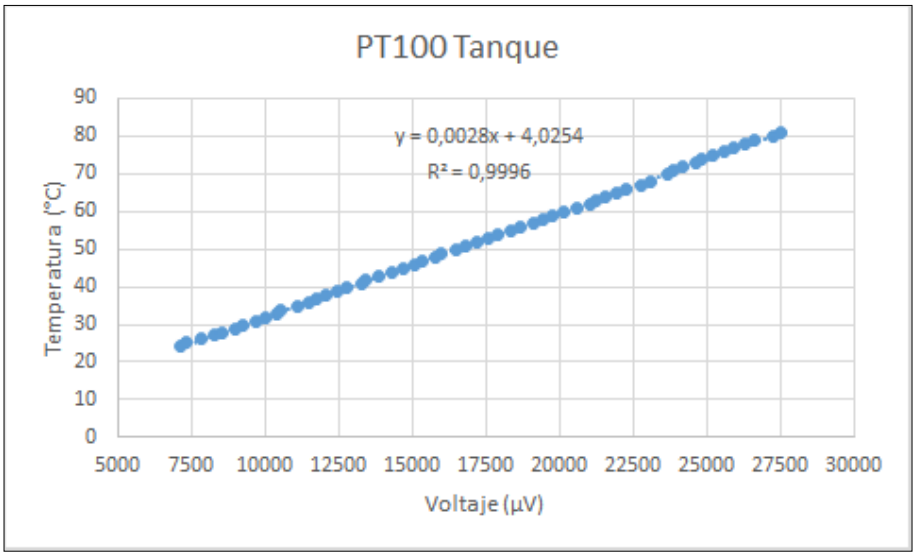


Figura 24. Voltaje vs temperatura para RTD del tanque de alloy [Autor].

Implementación del controlador

Se determinó utilizar la tarjeta de desarrollo de prototipos PSoC 5LP como controlador del sistema. Desde el software PSoC Creator 4.2 se realizó la programación de este dispositivo. Se dispusieron 18 pines como entradas para los sensores utilizados con su respectivo acondicionamiento, 3 pines como entradas para los nuevos mandos, 6 pines como salidas de visualización en display LCD 4x20 alfanumérico y 3 pines como salidas de control para la activación o desactivación de los SSR para un total de 30 pines. Por otro lado, el ADC Delta Sigma del dispositivo PSoC 5LP puede tener hasta 4 configuraciones y una configuración común [4][5]. En este proyecto se utilizaron 3 configuraciones, todas en modo diferencial; la primera con un rango de ± 0.512 V, destinada para leer el voltaje de la PT100 y la resistencia de referencia; la segunda con un rango de ± 0.625 V, destinada para la lectura de voltaje de los sensores LM35; y la tercera con un rango de ± 0.064V destinada para el rango de voltaje de las termocuplas. El ADC puede tener tantos canales como pines disponibles gracias al multiplexor análogo interno del PSoC 5LP [3][11].

La figura 25 muestra el esquema del sistema de control diseñado.

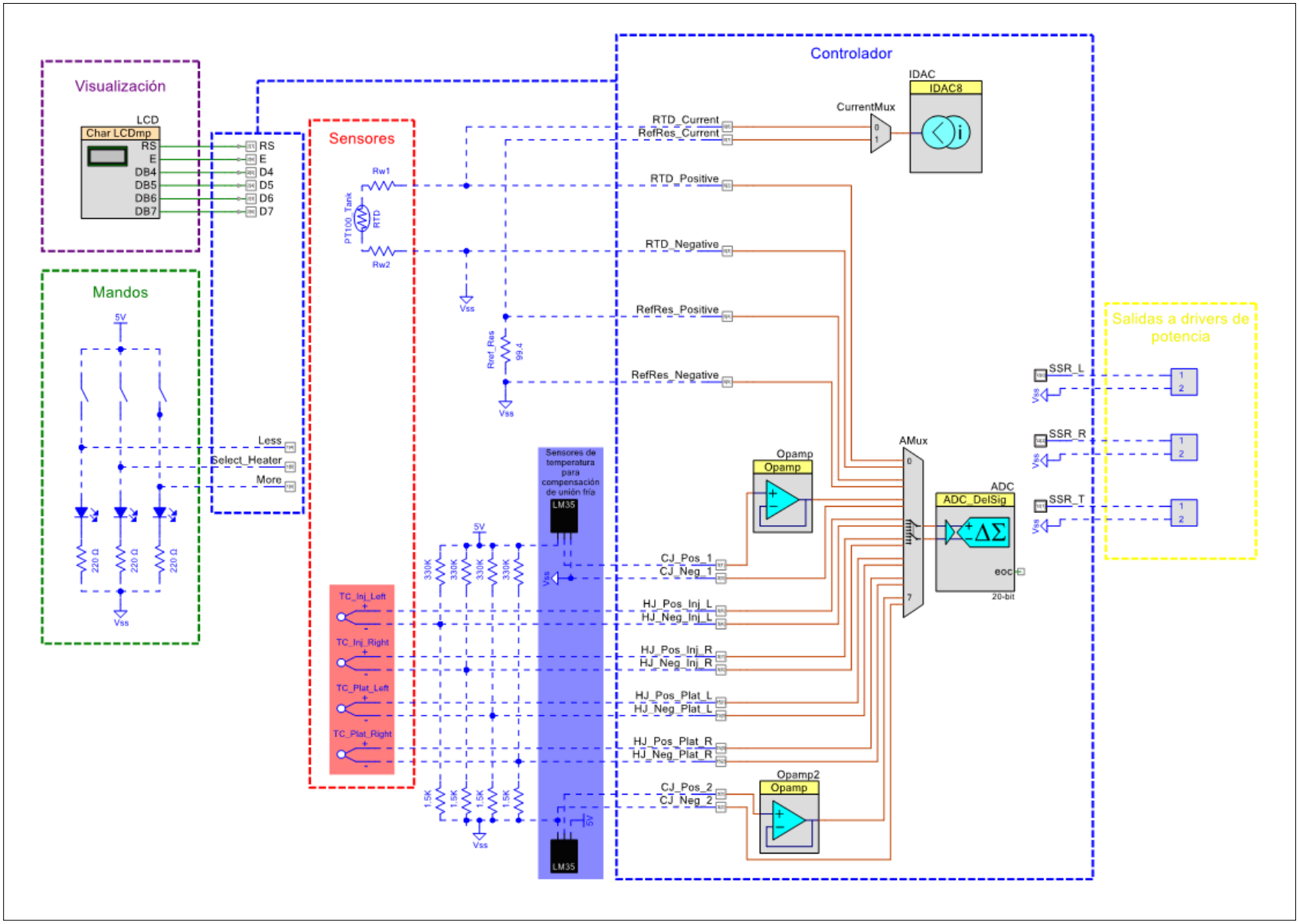


Figura 25. Esquema del sistema de control de temperatura diseñado [Autor].

El dispositivo PSoC 5LP se programó con un algoritmo de control clásico ON – OFF con una modificación en la activación de la calefacción de los inyectores. Debido al rápido calentamiento de los inyectores en un pulso continuo, se determinó activar los mismos con un pulso de 10 ms por bucle. El algoritmo de control adoptado se representa en la figura 26.

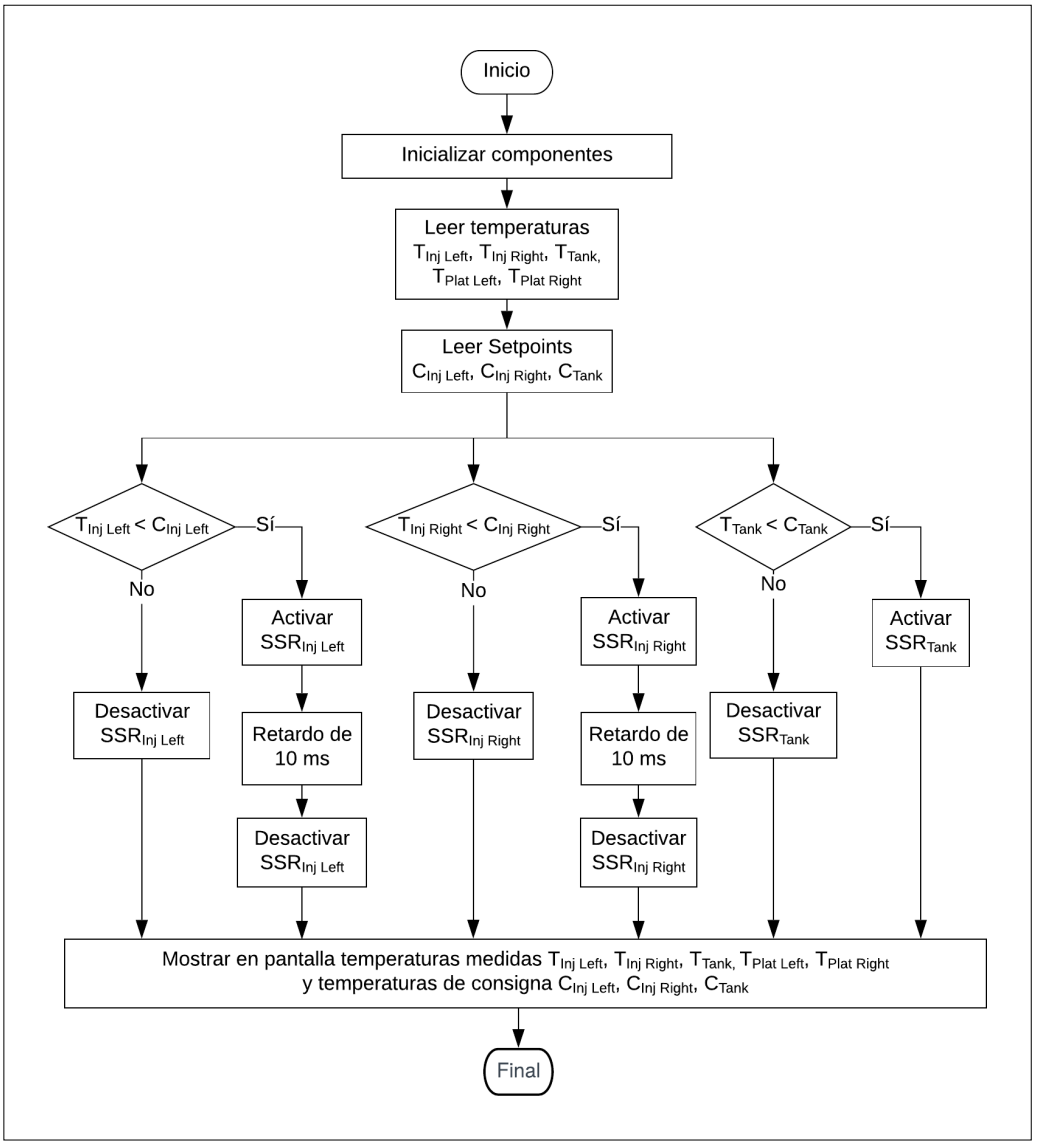


Figura 26. Algoritmo de control del proceso [Autor].

Implementación de mandos y visualización

Se utilizó el display LCD alfanumérico 4x20 para la visualización de las temperaturas medidas y de consigna. Para el dispositivo de mando se utilizaron 3 pulsadores con una configuración

de resistencias pull-down; las funciones del nuevo dispositivo de mando son las de disminuir, seleccionar o aumentar la temperatura de consigna.

Se diseñó una nueva cubierta de mandos y visualización. Para acoplar el display LCD y los pulsadores a la máquina, se diseñó una lámina en acero inoxidable; el diseño se completa con un par de piezas en acrílico que permiten encerrar y proteger el espacio donde está ubicada la tarjeta de control, como se muestra en la figura 27.



Figura 27. Nueva cubierta de mandos y visualización [Autor].

4. Resultados

A continuación se presentan las gráficas de las temperaturas medidas por el multímetro versus las temperaturas medidas por el sistema de control y monitoreo implementado. Cabe recordar que la temperatura de trabajo de los inyectores y del tanque está entre 55 °C y 60 °C; por su parte, las plataformas tienen una temperatura de trabajo entre 15 °C y 20 °C.

La temperatura medida en el inyector izquierdo presenta un error máximo de 1°C entre el rango de la temperatura de trabajo. Fuera de la temperatura de trabajo el error máximo alcanza los 2 °C. La regresión lineal de todo el rango de temperatura registrado para el inyector izquierdo se presenta en la figura 28.

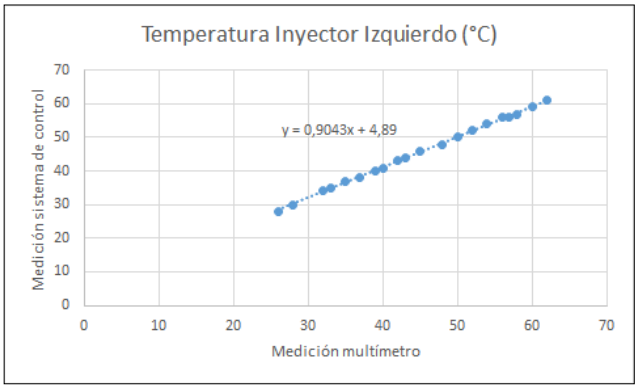


Figura 28. Temperaturas medidas en el inyector izquierdo [Autor].

La regresión lineal en los datos del inyector izquierdo presenta una pendiente de 0.904. En la figura 29 se muestra la representación de los datos del inyector derecho, estos indican que la pendiente está más cerca de 1 con un valor de 0.9716.

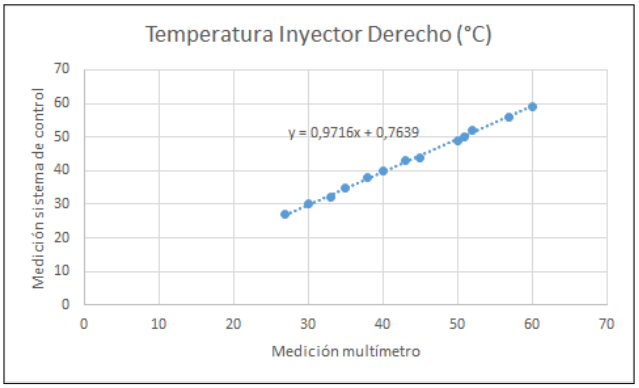


Figura 29. Temperaturas medidas en el inyector derecho [Autor].

La gráfica de medición de temperatura en el tanque de alloy (figura 30), presenta una pendiente de 1 en la regresión lineal. El error máximo presentado a lo largo de todo el rango de medición fue de 0 °C.

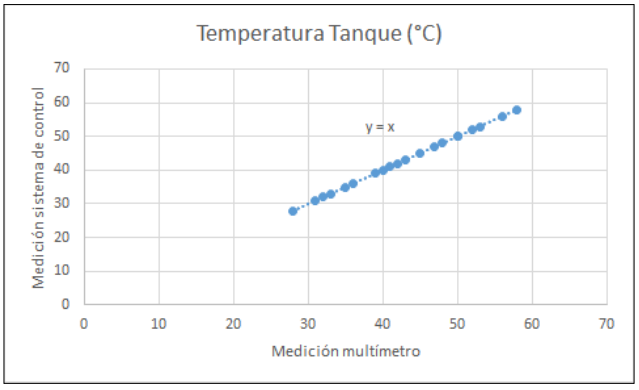


Figura 30. Temperaturas medidas en el tanque [Autor].

De acuerdo con los datos graficados de las mediciones realizadas en las plataformas (figuras 31 y 32), el error más grande del sistema se presenta las plataformas de bloqueo. El error máximo alcanza los 3 °C fuera de la temperatura de trabajo. Dentro de la temperatura de trabajo, el error máximo en la plataforma izquierda es de 1 °C y en la plataforma derecha es de 2 °C.

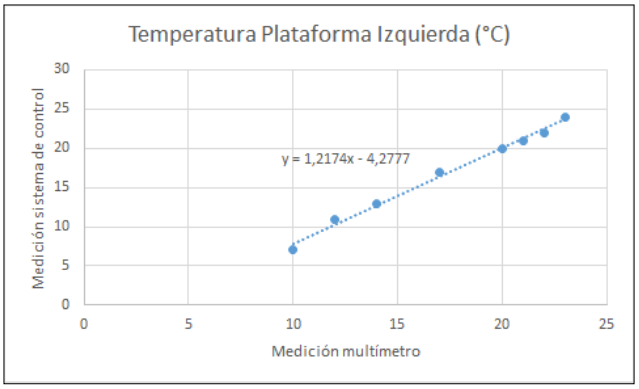


Figura 31. Temperaturas medidas en la plataforma izquierda [Autor].

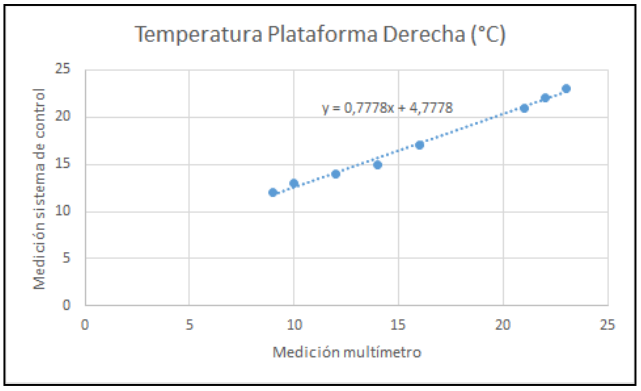


Figura 32. Temperaturas medidas en la plataforma derecha [Autor].

5. Conclusiones

El control y monitoreo de temperatura del tanque tiene el mejor rendimiento del sistema. Varios factores favorecen el proceso; el agua es un fluido térmico apropiado para conservar la temperatura de trabajo de la máquina, esto implica un tiempo suficientemente largo para tener una respuesta satisfactoria del sensor resistivo PT100 y la estabilidad requerida.

El control de temperatura en los inyectores presenta una estabilidad satisfactoria, la temperatura se mantiene en los valores suficientes para garantizar el flujo de alloy y evitar el taponamiento de los inyectores.

El monitoreo de temperatura de las plataformas presenta el menor desempeño del sistema; sin embargo en la temperatura de trabajo su rendimiento es aceptable y suficiente para detectar cuándo la temperatura de la plataforma se aleja de la región de trabajo.

La tarjeta de desarrollo de prototipos PSoC 5LP presenta un desempeño satisfactorio para tener un bajo costo y unas características de precisión y exactitud sobresalientes.

Es fundamental mantener el aislamiento de la masa de los circuitos electrónicos que reciben la señal de los sensores con la masa de tierra de la máquina. Un pequeño contacto puede distorsionar fuertemente la señal de un sensor resistivo como el PT100.

El comportamiento de los circuitos de medición de temperatura varía notablemente entre el montaje en protoboard y el montaje en circuito impreso. Es necesario volver a evaluar el comportamiento de los sensores de temperatura cuando se ha ensamblado el circuito impreso.

Se contempla en un futuro implementar un sistema de control de temperatura para las plataformas de bloqueo, las cuales funcionan con un sistema de refrigeración manual. De igual manera, se contempla implementar un sistema de medición de temperatura más preciso.

6. Referencias bibliográficas

[1] LOH OPTIKMASCHINEN AG, “Instrucciones de funcionamiento LOH Alloy Blocker 2000,” Wetzlar, 1995.

[2] NIST, “ITS-90 Table for Thermocouples.” [Online]. Available: https://srdata.nist.gov/its90/type_j/0to300.html. [Accessed: 08-Oct-2019].

[3] Cypress Semiconductor Corporation, P. Sekar, and T. Dust, “AN75511 - PSoC® 3 / PSoC 5LP - Temperature Measurement With Thermocouples,” no. 001. Cypress Semiconductor Corporation, pp. 1–17.

[4] Cypress Semiconductor Corporation, “CE219905 - PSoC 3 and PSoC 5LP: Temperature Sensing with a Thermocouple,” no. 002. Cypress Semiconductor Corporation, pp. 1–10.

[5] Cypress Semiconductor Corporation, “Delta Sigma Analog to Digital Converter (ADC _ DelSig).” pp. 1–51.

[6] Cypress Semiconductor Corporation, “Operational Amplifier (Opamp).” pp. 1–16.

[7] Cypress Semiconductor Corporation, P. Sekar, and T. Dust, “AN70698 - PSoC® -

Temperature Measurement with an RTD.” pp. 1–29.

[8] Cypress Semiconductor Corporation, “CE210383 – PSoC Temperature Sensing with an RTD.” pp. 1–12.

[9] Cypress Semiconductor Corporation, “8-Bit Current Digital to Analog Converter (IDAC8).” pp. 1–24.

[10] Maxwell, “MS-1DA.pdf.” .

[11] Cypress Semiconductor Corporation, “Analog Multiplexer Sequencer (AMuxSeq),” pp. 1–9.