



**Monitoreo de la fabricación de los intercambiadores compactos usando el método
de fundición por cera perdida**

Puebla Montero, Cristian Javier

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

PhD. Lara Padilla, Hernán Vinicio

3 de marzo 2023



CERTIFICADO DE ANÁLISIS
magister

Monitoreo de la fabricación de los intercambiadores compactos usando el metodo de fundición por cera perdida-Cristian-Puebla-17022023

< 1% Similitudes
< 1% Texto entre comillas
0% similitudes entre comillas
< 1% Idioma no reconocido

Nombre del documento: Monitoreo de la fabricacion de los intercambiadores compactos usando el metodo de fundición por cera perdida-Cristian-Puebla-17022023.pdf
ID del documento: 9a796bc695182422e7dbad9eb9a7511a0c615ef5
Tamaño del documento original: 567,43 ko

Depositante: DAVID CESAR LOZA MATOVELLE
Fecha de depósito: 22/2/2023
Tipo de carga: Interface
fecha de fin de análisis: 22/2/2023

Número de palabras: 20.400
Número de caracteres: 120.235

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	ingenieriaindustrialupvmtareasytrabajos.files.wordpress.com https://ingenieriaindustrialupvmtareasytrabajos.files.wordpress.com/2012/08/cartas-de-control-por-v...	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (70 palabras)
2	vsip.info Trabajo Final Transferencia de Calor Aporte 1 - VSIP.INFO https://vsip.info/trabajo-final-transferencia-de-calor-aporte-1-pdf-free.html	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (28 palabras)
3	Documento de otro usuario #03d7da El documento proviene de otro grupo 2 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (21 palabras)
4	www.bloginstrumentacion.com Cómo funciona un termopar - Blog de WIKA https://www.bloginstrumentacion.com/productos/temperatura/cmo-funciona-termopar/	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (22 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	dSPACE.ups.edu.ec Desarrollo de un sistema basado en internet Industrial de las c... http://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21950/1/UPS-GT003631.pdf	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (10 palabras)
2	Documento de otro usuario #f09009 El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (11 palabras)

Fuente mencionada (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

- <https://github.com/tzapu/WiFiManager>



Escanea el código QR para
HERNÁN VINICIO LARA
PADILLA



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Monitoreo de la fabricación de los intercambiadores compactos usando el método de fundición por cera perdida”** fue realizado por el señor **Puebla Montero, Cristian Javier**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 20 de marzo de 2023.

Firma:



Firmado electrónicamente por:
**HERNAN VINICIO LARA
PADILLA**

.....
Ing. Lara Padilla, Hernán Vinicio PhD

C. C. 0603247362



Departamento de Ciencias de la energía y mecánica
Carrera de mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Yo **Puebla Montero, Cristian Javier** con cédula de ciudadanía n° 1726974627, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Monitoreo de la fabricación de los intercambiadores compactos usando el método de fundición por cera perdida** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 17 de febrero del 2023

Firma

Puebla Montero Cristian Javier

C.C.: 1726974627



Departamento de Ciencias de la energía y mecánica

Carrera de mecatrónica

Autorización de Publicación

Yo **Puebla Montero, Cristian Javier** con cédula de ciudadanía n° 1726974627, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Monitoreo de la fabricación de los intercambiadores compactos usando el método de fundición por cera perdida** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 17 de febrero del 2023

Firma

Puebla Montero Cristian Javier

C.C.: 1726974627

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a Dios, quien es el que guía mi camino a cada paso y cada circunstancia y es el que me ha dado las capacidades para superar cada obstáculo.

A mis padres y hermano, quienes han sido mis compañeros y mis guías desde niño y han puesto en mi los valores necesarios para no rendirme.

A mis tíos y mis primos, que siempre han estado compartiendo cada logro y cada batalla en mi vida

Y a mis amigos con quienes siempre pude contar cuando necesitaba un empujón.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme vivir y luchar cada etapa de esta carrera, porque estoy consciente que, sin él, no lo hubiera logrado

A mi madre, que siempre estuvo ahí para reconstruirme y ponerme en marcha cuando más lo necesitaba

A mi padre, que siempre estuvo dispuesto a ayudarme en todo lo que necesitara sin importar la hora o la circunstancia.

A mi tutor de tesis, quien con su guía y su entrega a la docencia me supo guiar y apoyar para que el trabajo pueda ser terminado.

A mis amigos y a todas aquellas personas que estuvieron presentes dándome su apoyo incondicional tanto académico como personal.

Índice de contenidos

Dedicatoria	6
Agradecimientos	7
Resumen	18
Abstract	19
Capítulo I: Introducción.....	20
Antecedentes	20
Justificación e Importancia.....	22
Alcance.....	23
Objetivos.....	24
<i>Objetivo General</i>	24
<i>Objetivos Específicos</i>	24
Capítulo II: Estado del Arte.....	25
Descripción General del Tema	25
<i>Intercambiador de Calor</i>	25
<i>TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces TPMS)</i>	26
<i>Manufactura Aditiva</i>	27
<i>Fundición por Cera Perdida en Joyería</i>	31
Industria 4.0 y el Big Data.....	37

	9
Cartas de Control y Calidad.....	38
Capítulo III: Parámetros de Fundición.....	43
Diseño y Modelamiento de TPMS	43
Impresión.....	45
Material Cerámico	49
Metal de Fundición.....	51
Capítulo IV: Sensor y Acondicionamiento.....	56
Identificación de Parámetros	56
<i>Sensor de Temperatura (Termopar Tipo K)</i>	56
<i>Sensor de Temperatura y Humedad Ambiental</i>	61
<i>Tarjeta de Adquisición de Datos</i>	63
<i>Factor Corriente</i>	67
<i>Fuente de Alimentación</i>	68
<i>Tiempo de Muestreo</i>	69
Armado y Acondicionamiento	69
<i>Encapsulado</i>	71
<i>Ubicación del Termopar Tipo K</i>	72
<i>Tiempo de Muestreo</i>	73
Capítulo V: Programación y Base de Datos.....	76
Herramientas para el Desarrollo.....	76
<i>Arduino</i>	76

	10
<i>Wifi Manager</i>	76
<i>Firestore</i>	77
<i>Hojas de Cálculo de Google</i>	78
Programación	79
<i>Inicialización de la Base de Datos</i>	80
<i>Comunicación ESP32 - Firestore</i>	80
<i>Comunicación Firestore - Hojas de Cálculo de Google</i>	85
Dashboard.....	85
Capítulo VI: Funcionamiento y Desarrollo.....	88
Capítulo VII: Análisis y Discusión de Resultados.....	96
Resultados del Diseño Experimental.....	96
Calidad Superficial.....	96
Peso de los Intercambiadores.....	99
Monitoreo de Quemado	101
WAX40.....	102
WAX RESIN.....	109
Resumen y Análisis General.....	114
Monitoreo de Fundición.....	114
Fundición a 150 °C en el Cubilete.....	114
Fundición a 345 °C en el Cubilete.....	116
Fundición a 540 °C en el Cubilete.....	118

	11
Resumen y Análisis General.....	119
Monitoreo de Funcionalidad.....	121
Prueba Intercambiador de Calor Comercial	121
Prueba L5 Orientación 45°	125
Prueba L10 Orientación 45°	130
Prueba L15 Orientación 45°	135
Prueba L5 Orientación 0°	140
Prueba L10 Orientación 0°	145
Prueba L15 Orientación 0°	150
Resumen y Análisis General.....	155
Conclusiones.....	157
Recomendaciones	158
Bibliografía	159
Apéndices	165

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Graficas de control más utilizadas</i>	40
Tabla 2 <i>Modelo experimental de Taguchi</i>	45
Tabla 3 <i>Información de las propiedades de la resina</i>	46
Tabla 4 <i>Información de las de las fases de quemado para la resina</i>	48
Tabla 5 <i>Información de las fases de mezclado de material cerámico</i>	50
Tabla 6 <i>Etapa de traducción del problema se selección de material para el intercambiador TPMS</i>	51
Tabla 7 <i>Materiales preseleccionados para el intercambiador TPMS</i>	55
Tabla 8 <i>Características y tipos de termopares</i>	58
Tabla 9 <i>Tabla comparativa entre la Tarjeta ESP32 y ESP8266</i>	64
Tabla 10 <i>Clasificación de los pines de la ESP32</i>	65
Tabla 11 <i>Corriente usada por todos los dispositivos</i>	67
Tabla 12 <i>Conexión de DHT11</i>	70
Tabla 13 <i>Conexión de modulo MAX6675 (Sensor 1)</i>	70
Tabla 14 <i>Conexión de modulo MAX6675 (Sensor 2)</i>	70
Tabla 15 <i>Encapsulado de los dispositivos</i>	73
Tabla 16 <i>Duración de los procesos en materia de fundición</i>	75
Tabla 17 <i>Plan Spark de Firebase</i>	78
Tabla 18 <i>Tabla de respuesta para medias</i>	96
Tabla 19 <i>Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido. Más grande es mejor.</i> 97	97
Tabla 20 <i>Tabla de respuesta para medias</i>	99
Tabla 21 <i>Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido. Más grande es mejor</i> 100	100
Tabla 22 <i>Cálculo de errores en la fase de fundición</i>	119
Tabla 23 <i>Comparación de todos los experimentos de prueba</i>	156

Índice de figuras

Figura 1 <i>Esquema de un intercambiador de calor TPMS</i>	21
Figura 2 <i>Esquema grafico del proceso y alcance del presente proyecto</i>	23
Figura 3 <i>Clasificación de los intercambiadores de calor acorde a la construcción</i>	25
Figura 4 <i>Estructuras TPMS de giroides, diamantes y primitivas</i>	26
Figura 5 <i>Esquema del proceso de una impresora 3D FDM</i>	27
Figura 6 <i>Esquema del proceso de una impresora 3D que funciona a partir de fusión por lecho de polvo</i>	28
Figura 7 <i>Esquema del proceso de una impresora 3D que funciona a partir de chorro de tinta y elaboración de contorno</i>	29
Figura 8 <i>Secuencia de fotografías de la realización de la pieza en cera</i>	30
Figura 9 <i>Comparación entre la pieza y el cubilete</i>	32
Figura 10 <i>Introducción de la pieza al cubilete</i>	33
Figura 11 <i>Realización de superficie cóncava en cubilete</i>	34
Figura 12 <i>Realización de superficie cóncava en cubilete</i>	35
Figura 13 <i>Cubilete ingresado en el horno para quemado</i>	35
Figura 14 <i>Fase de limpiado y extracción de la estructura</i>	36
Figura 15 <i>Gráfico de control típico</i>	39
Figura 16 <i>Factores para la construcción de una carta de control de variables</i>	42
Figura 17 <i>TPMS consideradas para la fundición</i>	43
Figura 18 <i>Impresora 3D Form3</i>	46
Figura 19 <i>Información de las de las fases de quemado para la resina</i>	47
Figura 20 <i>Información de las de las fases de quemado para la resina</i>	49
Figura 21 <i>Información de las fases de quemado de yeso</i>	50

Figura 22 <i>Gráfico de conductividad térmica vs. Coeficiente de expansión térmica</i>	
<i>materiales aplicando filtros</i>	54
Figura 23 <i>Partes de un termopar</i>	57
Figura 24 <i>Esquema de todos los pines de ESP32</i>	60
Figura 25 <i>Sensor de temperatura termopar tipo K y modulo MAX6675</i>	61
Figura 26 <i>Sensor de temperatura DHT11</i>	63
Figura 27 <i>Esquema de todos los pines de ESP32</i>	65
Figura 28 <i>Fuente de protoboard</i>	68
Figura 29 <i>Conexión de dispositivos electrónicos en ESP32</i>	69
Figura 30 <i>Encapsulado de los dispositivos</i>	71
Figura 31 <i>Ubicación propuesta para el termopar tipo K dentro del cubilete</i>	72
Figura 32 <i>Interfaz de wifimanager</i>	77
Figura 33 <i>Diagrama de flujo de la programación en la ESP32</i>	79
Figura 34 <i>Declaración de librerías</i>	80
Figura 35 <i>Código de la declaración de variables</i>	81
Figura 36 <i>Código para la función Void Setup</i>	83
Figura 37 <i>Código para la función Void loop</i>	84
Figura 38 <i>Dashboard realizado para la visualización de datos</i>	86
Figura 39 <i>Diagrama general de flujo de todo el proceso de fundición (1)</i>	88
Figura 40 <i>Diagrama general de flujo de todo el proceso de fundición (2)</i>	89
Figura 41 <i>Servidor web Wifi-manager</i>	89
Figura 42 <i>Estructuras TPMS impresas en la resina WAX40</i>	91
Figura 43 <i>Estructura dentro del cubilete</i>	91
Figura 44 <i>Preparación del material cerámico y vertimiento en cubilete</i>	92
Figura 45 <i>Cubilete sometido al vacío</i>	93
Figura 46 <i>Cubilete sometido al vacío</i>	94

	15
Figura 47 <i>Ingreso del aluminio al molde.....</i>	95
Figura 48 <i>TPMS obtenida.....</i>	95
Figura 49 <i>Grafica de efectos principales para la calidad superficial</i>	97
Figura 50 <i>Grafica de efectos principales para Relaciones SN de la calidad superficial</i>	98
Figura 51 <i>Grafica de efectos principales para la calidad superficial</i>	99
Figura 52 <i>Grafica de efectos principales para Relaciones SN de la calidad superficial</i>	101
.....	
Figura 53 <i>Quemado de resina WAX 40 L10-9 alimentadores.....</i>	102
Figura 54 <i>División en zonas (Resina WAX 40 L10-9).....</i>	102
Figura 55 <i>Zona 1 grafica de control de medias.....</i>	103
Figura 56 <i>Zona 1 grafica de control de rangos</i>	104
Figura 57 <i>Zona 2 grafica de control de medias.....</i>	105
Figura 58 <i>Zona 2 grafica de control de rangos</i>	106
Figura 59 <i>Zona 3 grafica de control de medias.....</i>	107
Figura 60 <i>Zona 3 grafica de control de rangos</i>	107
Figura 61 <i>Zona 4 grafica de control de medias.....</i>	108
Figura 62 <i>Zona 4 grafica de control de rangos</i>	109
Figura 63 <i>Quemado de resina WAX RESIN L5-36 alimentadores.....</i>	110
Figura 64 <i>División en zonas (Resina WAX RESIN L5-36).....</i>	110
Figura 65 <i>Zona 1 grafica de control de medias.....</i>	111
Figura 66 <i>Zona 1 grafica de control de rangos</i>	112
Figura 67 <i>Zona 2 grafica de control de medias.....</i>	113
Figura 68 <i>Zona 2 grafica de control de rangos</i>	113
Figura 69 <i>Monitoreo de fundición 150 °C.....</i>	116
Figura 70 <i>Monitoreo de fundición 345 °C.....</i>	117
Figura 71 <i>Monitoreo de fundición 540 °C.....</i>	119

Figura 72 Serie de tiempo de la variación de temperatura en el intercambiador de calor comercial a 2.6 m/s.....	121
Figura 73 Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L5 a 2.6 m/s	122
Figura 74 Serie de tiempo de la variación de temperatura en el intercambiador de calor comercial a 6 m/s.....	124
Figura 75 Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L5 a 2.6 m/s	124
Figura 76 Prueba de TMPS L5 45°	125
Figura 77 Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L5 a 2.6 m/s..	126
Figura 78 Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L5 a 2.6 m/s	127
Figura 79 Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L5 a 6 m/s.....	128
Figura 80 Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L5 a 6 m/s	129
Figura 81 Prueba de TMPS L10 45°	130
Figura 82 Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L10 a 2.6 m/s	131
Figura 83 Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L10 a 2.6 m/s	132
Figura 84 Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L10 a 6 m/s...	133
Figura 85 Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L10 a 6 m/s	134
Figura 86 Prueba de TMPS L15 45°	135
Figura 87 Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L15 a 2.6 m/s	136
Figura 88 Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L15 a 2.6 m/s	137
Figura 89 Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L15 a 6 m/s...	138
Figura 90 Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L15 a 6 m/s	139
Figura 91 Prueba de TMPS L5 0°	140
Figura 92 Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L5 a 2.6 m/s..	141
Figura 93 Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L5 a 2.6 m/s	142
Figura 94 Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L5 a 6 m/s.....	143
Figura 95 Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L5 a 6 m/s	144

Figura 96 <i>Prueba de TMPS L10 0°</i>	145
Figura 97 <i>Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L10 a 2.6 m/s</i>	146
Figura 98 <i>Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L10 a 2.6 m/s</i>	147
Figura 99 <i>Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L10 a 6 m/s...</i>	148
Figura 100 <i>Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L10 a 6 m/s</i>	149
Figura 101 <i>Prueba de TMPS L15 0°</i>	150
Figura 102 <i>Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L15 a 2.6 m/s</i>	151
Figura 103 <i>Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L15 a 2.6 m/s</i>	152
Figura 104 <i>Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L15 a 6 m/s.</i>	153
Figura 105 <i>Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L15 a 6 m/s</i>	154

Resumen

El presente trabajo lleva a cabo el monitoreo del proceso de fundición de un intercambiador de calor compacto de superficies mínimas triple periódicas, TPMS (Por sus siglas en inglés) utilizando el método de fundición por cera perdida. Este método consiste en realizar un molde de cerámica a partir de una estructura de cera. Estructura que, al poder ser impresa por manufactura aditiva, proporciona gran precisión y permite la obtención de alta resolución en piezas con estructura compleja. El monitoreo en el proceso de fundición in-situ, se dividió en 2 fases; el quemado de la resina para crear el molde cerámico y el vertimiento del material metálico dentro del molde siguiendo un diseño experimental que conformaba 3 factores (Temperatura de molde, sistema de alimentación y longitud de celda unidad de la TPMS). Con el fin de obtener un proceso optimizado y estructuras bien definidas. Los datos recolectados en todo el proceso se guardan en tiempo real en la base de datos de Firebase a través de la tarjeta de adquisición de datos ESP32 que a su vez son transmitidos a una hoja de cálculo de Google, donde se muestra de manera visual en un Dashboard los procesos que se están llevando a cabo en el instante. Posteriormente se realizó un post procesamiento de los datos registrados por el monitoreo de las diferentes estructuras fundidas para analizar en graficas de control el rendimiento de su proceso siguiendo la norma ASTM-E2587. Y así concluir con la mejor forma de fundir una TPMS y proporcionar una visión abierta de la funcionalidad del monitoreo para la industria 4.0.

Palabras clave: TPMS, fundición por cera perdida, monitoreo.

Abstract

The present work carries out the monitoring of the casting process of a compact triple periodic minimum surface heat exchanger (TPMS) using the lost wax casting method. This method consists of making a ceramic mold from a wax structure. This structure, which can be printed by additive manufacturing, provides high precision, and allows obtaining high resolution in parts with complex structure. The monitoring in the in-situ casting process was divided into 2 phases; the burning of the resin to create the ceramic mold and the pouring of the metallic material into the mold following an experimental design that conformed 3 factors (mold temperature, feeding system and TPMS unit cell length). In order to obtain an optimized process and well-defined structures. The data collected throughout the process are stored in real time in the Firebase database through the ESP32 data acquisition card, which in turn are transmitted to a Google spreadsheet, which shows visually in a Dashboard the processes that are being carried out at the moment. Subsequently, a post processing of the data recorded by the monitoring of the different cast structures was performed to analyze in control charts the performance of their process following the ASTM-E2587 standard. And thus, conclude with the best way to cast a TPMS and provide an open view of the monitoring functionality for Industry 4.0.

Keywords: TPMS, lost wax melting, monitoring.

Capítulo I: Introducción

Antecedentes

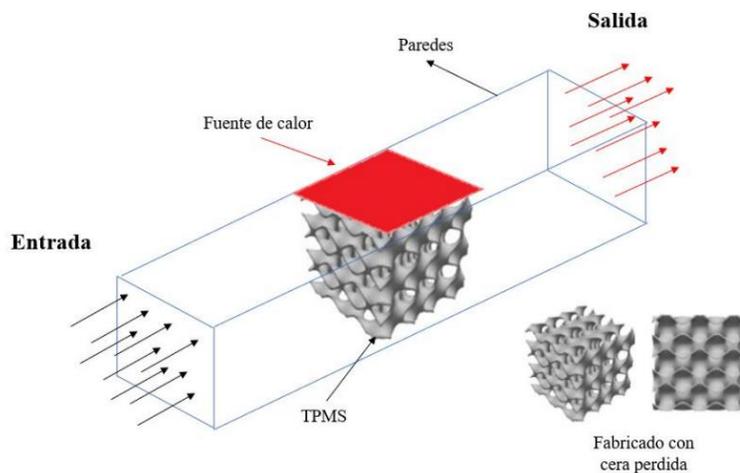
Un intercambiador de calor es un dispositivo que tiene el fin de transferir el calor entre dos superficies o fluidos, cualidad que con el pasar de los años ha requerido ser perfeccionada para mejorar el rendimiento que tienen diversos equipos de gran relevancia en el desarrollo de sistemas avanzados de gestión de calor y energía (Kim & Yoo, 2020) para aplicaciones ingenieriles ya sea en industrias químicas, automotrices, aeroespaciales, alimentarias, manufactura, entre otras. (Pereira, 2019)

Entre los intercambiadores de calor, existen intercambiadores pasivos; en donde se encuentran los disipadores, los cuales transfieren el calor generado por un dispositivo ya sea mecánico o electrónico a un medio o fluido disipando la energía liberada en forma de calor a una distancia apartada, para que de esta manera se pueda reducir la temperatura en el dispositivo. En una búsqueda por la optimización y perfeccionamiento de la técnica de disipación, nuevas tecnologías como la manufactura aditiva de metales y el diseño computacional de estructuras con características TPMS (superficies mínimas triples periódicas), que tienen propiedades termo físicas prometedoras, han demostrado teóricamente tener una gran eficiencia en la disipación de calor. (Attarzadeh et al., 2021)

Estas estructuras TPMS requieren para su fabricación, la manufactura aditiva cuya tecnología permite la fundición del material usando un láser que construye dicha pieza capa por capa (Walker et al., 2018). Actualmente en Ecuador no hay la tecnología de fabricación aditiva de metales, y es por esta razón que se ha propuesto usar la técnica de impresión 3D por estereolitografía y fundición por cera perdida para obtener estas estructuras complejas metálicas.

Figura 1

Esquema de un intercambiador de calor TPMS



Nota. En la imagen se muestra la finalidad de la nota conceptual, la TPMS siendo probada.

Para que este proceso de fundición sea eficiente se ha dispuesto un monitoreo in-situ para la detección y análisis de la formación de estas estructuras metálicas con el fin de recopilar datos que alimenten de información el desarrollo de este. Para que de esta manera pueda haber un validación, cuantificación y seguimiento en cuanto a los parámetros internos de la fundición (Walker et al., 2018). Este monitoreo in-situ bien aplicado (constituyendo factores esenciales de monitoreo y control), permitirá recopilar datos que, con su estudio ayudarán a fabricar piezas de mejor calidad.

El control en la fundición de cera perdida es de suma importancia para garantizar una calidad aceptable y constante en el producto y es crítico cuando las piezas fundidas a realizar tienen estructuras complejas como la TPMS. (Hashmi et al., 2014) El presente proyecto propone realizar un monitoreo in-situ de acuerdo con lo especificado, en las diferentes fases de

la fundición por cera perdida de la estructura TPMS, ejecutando una captura y análisis de datos que permita comprender el rendimiento, desarrollo y tener un seguimiento visualizado del proceso de fundición. Con el objetivo de entregar piezas que estén dentro de los límites de especificación con dimensiones nominales y microestructuras ideales, que cumplan con los requerimientos de un intercambiador de calor eficiente.

Justificación e Importancia

La eficiencia de un intercambiador de calor puede traer impactos significativos para los costos en términos de pérdidas de producción, eficiencia energética y mantenimiento. Por dicha razón, la necesidad de fabricar disipadores de calor con un buen rendimiento y calidad es cada vez más importante para las nuevas tecnologías.

El proyecto se centra en el monitoreo in-situ de la fabricación de los intercambiadores de calor compactos planteando un seguimiento en las diferentes fases del proceso de fundición por cera perdida. Estas fases consisten en:

1. Cocido de material cerámico (yeso) con el molde impreso por estereolitografía siguiendo las recomendaciones de tratamiento de la resina usada.
2. Ingreso del metal al molde cerámico
3. Pieza terminada para estudio.

El monitoreo in-situ en las múltiples fases mencionadas requerirá para el proceso el uso de; sensores de temperatura, tarjeta de adquisición de datos (ESP32) y tecnología IoT que proporcionaran los datos necesarios para el estudio de calidad y control. Permitiendo de esta manera conseguir piezas con un rendimiento y eficiencia que puedan solucionar y mejorar el intercambio de calor en sistemas tecnológicos complejos. La implementación del IoT en este proyecto, es de suma importancia para el control y el sistema remoto multiusuario. Proponiendo un estudio capaz de identificar la desviación de los parámetros de entrada y salida de la media

de funcionamiento normal y que los datos que se obtengan sirvan en presentes y futuros estudios, para mejorar la calidad de la fundición y su resultado.

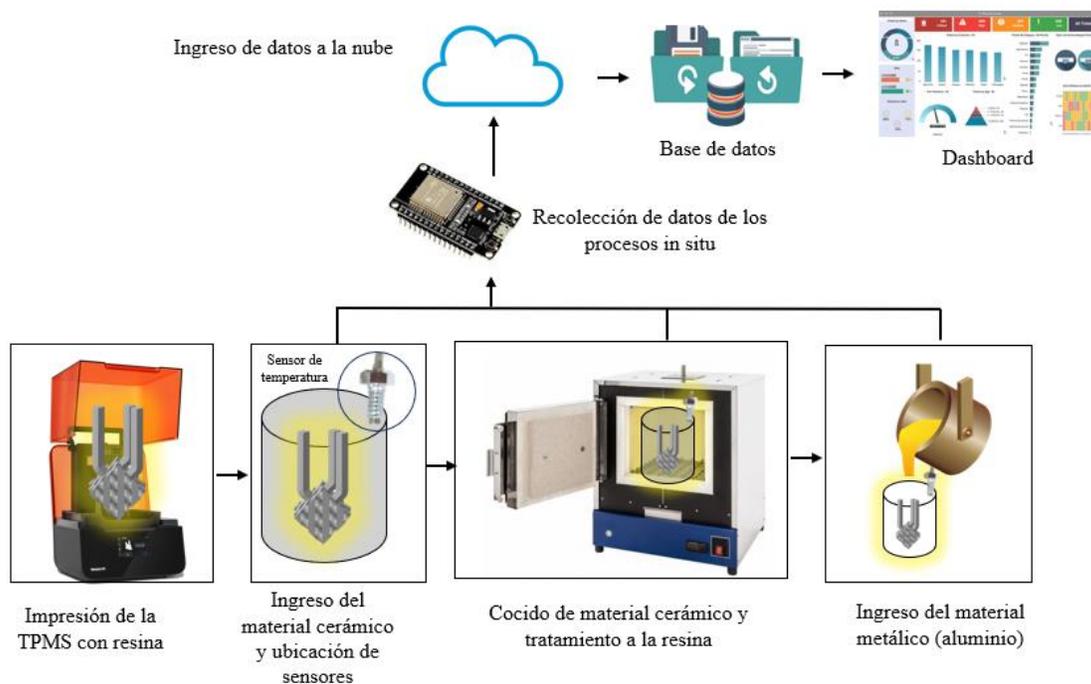
Se usará una plataforma lot abierta que pueda supervisar y diagnosticar los datos mencionadas para que se pueda implementar características únicas de un tratamiento de datos como; limpieza de datos que aislé una tendencia neta de ensuciamiento, modelos adaptativos de aprendizaje y diagnósticos y apoyo visual de gráficos estadísticos.

Alcance

Para el desarrollo de este, se plantea un esquema del trabajo a realizar desde la impresión del TPMS hasta la fundición, como se muestra en la **Figura 2**

Figura 2

Esquema grafico del proceso y alcance del presente proyecto



Nota. El esquema muestra de manera gráfica el proceso que seguirá el presente proyecto para cumplir sus objetivos.

Objetivos

Objetivo General

Monitorear la fabricación de los intercambiadores compactos usando el método de fundición por cera perdida.

Objetivos Específicos

- Identificar los parámetros críticos de la fundición por cera perdida y seleccionar los sensores más adecuados para las presentaciones.
- Diseñar y construir la plataforma de instrumentación IoT para monitoreo in-situ.
- Realizar el acondicionamiento y la implementación de los sensores para el monitoreo in-situ de la fundición.
- Implementar y probar la plataforma IoT de monitoreo in-situ para la fundición.
- Analizar el desempeño de plataforma usando herramientas estadísticas como cartas de control para variables según ASTM-E2587

Capítulo II: Estado del Arte

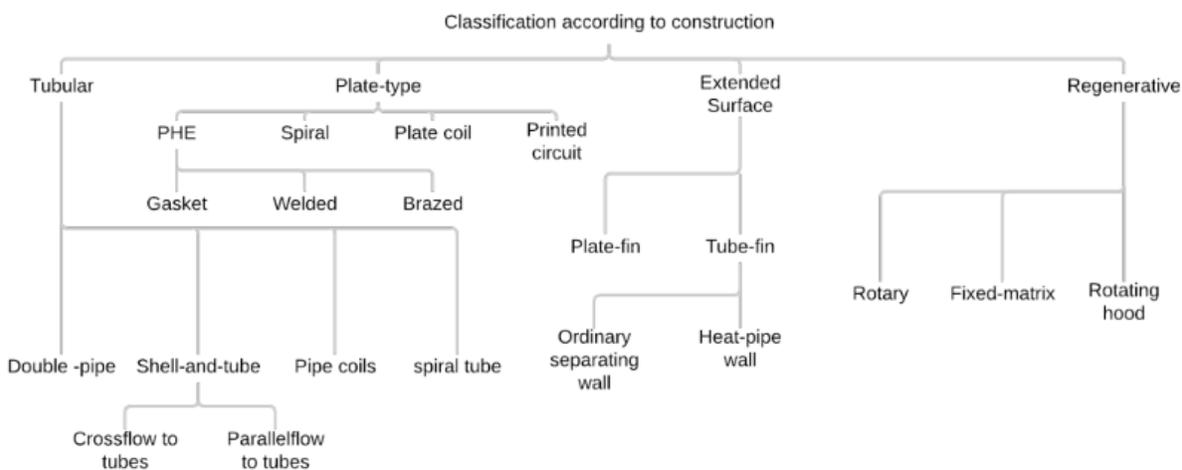
Descripción General del Tema

Intercambiador de Calor

Un intercambiador de calor es un dispositivo que permite la transferencia de calor entre 2 o más fluidos que generalmente están a diferentes temperaturas y que tienen diversas aplicaciones a nivel ingenieril ya sea en la producción de energía, procesamientos de alimentos y productos químicos, electrónica, motores, industrias manufactureras, recuperación de calor residual, refrigeración y aire acondicionado. De acuerdo con eso se clasifica para los intercambiadores de la siguiente manera. Como se muestra en la Figura 3 (Pereira, 2019)

Figura 3

Clasificación de los intercambiadores de calor acorde a la construcción



Nota. La figura muestra la clasificación de los intercambiadores de calor en base a su construcción. Tomado de tomada de *Laminar flow and heat transfer in triply periodic minimal surfaces*, por Pereira Passos, 2019.

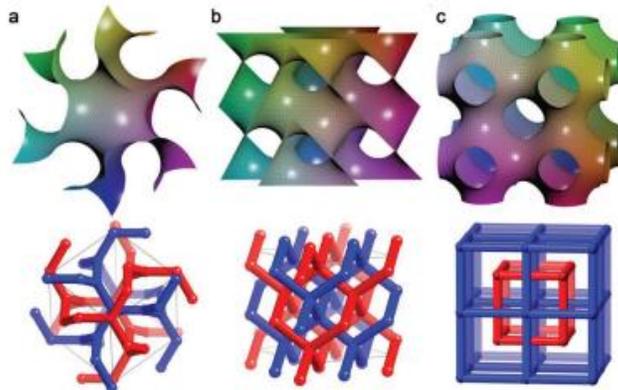
TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces TPMS)

Las superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS) tienen su inspiración en la naturaleza cuyo campo está altamente relacionado con sistemas naturales, tales como membranas biológicas y estructuras biofotónicas en escamas de alas de mariposa. Estructuras altamente simétricas y con propiedades físicas optimizadas. (Han y Che, 2018).

En los TPMS, una superficie 3D periódica, única y equilibrada, continua y mínima; separa dos laberintos entrelazados a ambos lados. Para estas estructuras, a menudo se suelen utilizar grafos esqueléticos, que son redes de varillas que representan los centros de los dos laberintos. Suelen denominarse doble giroides (DG), doble diamante (DD) y doble primitiva (DP) y se conocen como fases bicontinuas o redes Inter penetrantes tal como se muestra en la Figura 4. En las estructuras mencionadas, la superficie mínima separa el espacio en dominios de igual volumen. (Han y Che, 2018)

Figura 4

Estructuras TPMS de giroides, diamantes y primitivas



Nota. La imagen muestra a) Superficie giroide, b) Superficie diamante, c) Superficie Primitiva. Tomado de *An Overview of Materials with Triply Periodic Minimal Surfaces and Related Geometry: From Biological Structures to Self-Assembled Systems* por Han, L., & Che, S. (2018).

Manufactura Aditiva

La manufactura aditiva es una rama de los procesos de fabricación de más reciente uso a nivel industrial y que fue descrito por primera vez en 1986 por Charles Hull. Esta consiste en la impresión de una sucesión de capas de materiales que al irse sobreponiendo una sobre otra forman una estructura prediseñada (Ngo et al., 2018).

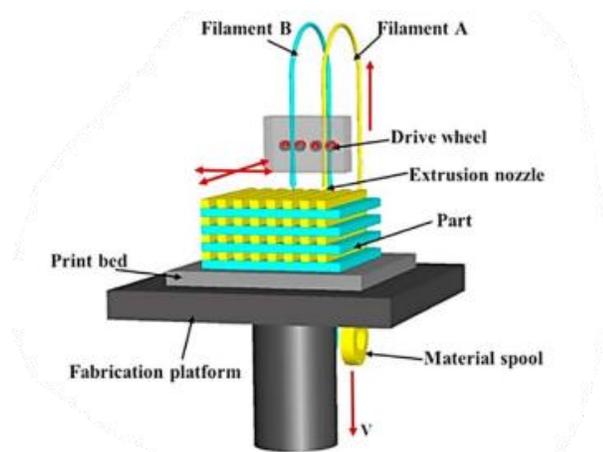
Existen varios métodos que realizan manufactura aditiva (MA), los cuales son:

Modelado por deposición fundida (FDM)

En este método, se usa un filamento continuo de un polímero termoplástico que, al calentarse en la boquilla hasta alcanzar un estado semilíquido, se extruye sobre una plataforma en donde se va construyendo capa por capa una estructura en 3D. (Ngo et al., 2018)

Figura 5

Esquema del proceso de una impresora 3D FDM



Nota. El esquema de la imagen muestra las partes y el proceso de una impresora 3D FDM.

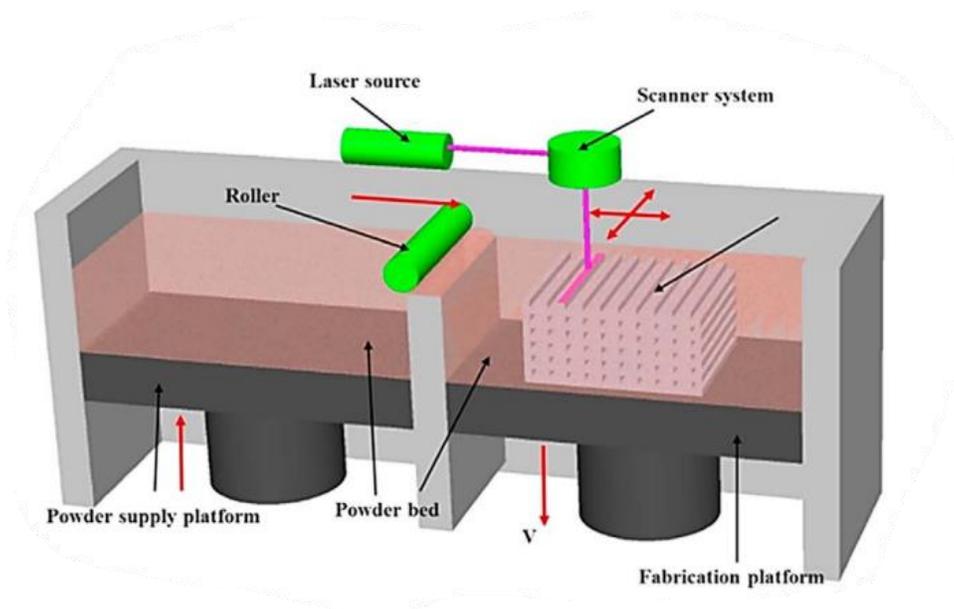
Tomado de *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenge* por Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018).

Fusión por lecho de polvo (Powder bed fusión, PBF)

Esta técnica se basa en la deposición de sucesivas capas de material en polvo muy fino que se compactan en una plataforma. La capa se funde con un rayo láser o un aglutinante creando de forma sucesiva cada capa y fusionándose hasta conseguir la pieza 3D final (Ngo et al., 2018)

Figura 6

Esquema del proceso de una impresora 3D que funciona a partir de fusión por lecho de polvo



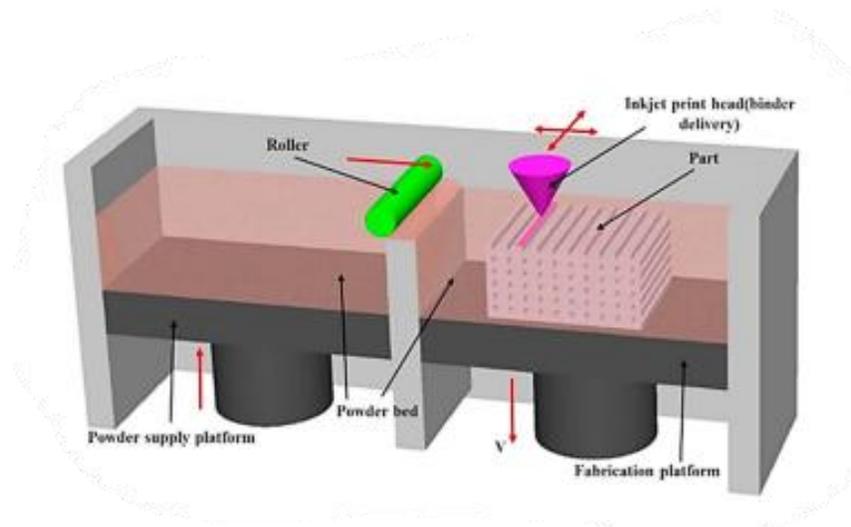
Nota. El esquema de la imagen muestra las partes y el proceso de una impresora 3D por fusión por lecho de polvo. Tomado de *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenge* por Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018).

Impresión por chorro de tinta y elaboración de contornos

Este tipo de manufactura aditiva se usa para imprimir estructuras cerámicas complejas y avanzadas. Y consiste en bombear una suspensión cerámica estable que se deposita en forma de gotitas a través de la boquilla de inyección de estrato en donde por consiguiente las gotitas forman un patrón continuo que se solidifica hasta alcanzar resistencia suficiente para sostener las siguientes capas (Utela et al., 2008)

Figura 7

Esquema del proceso de una impresora 3D que funciona a partir de chorro de tinta y elaboración de contorno



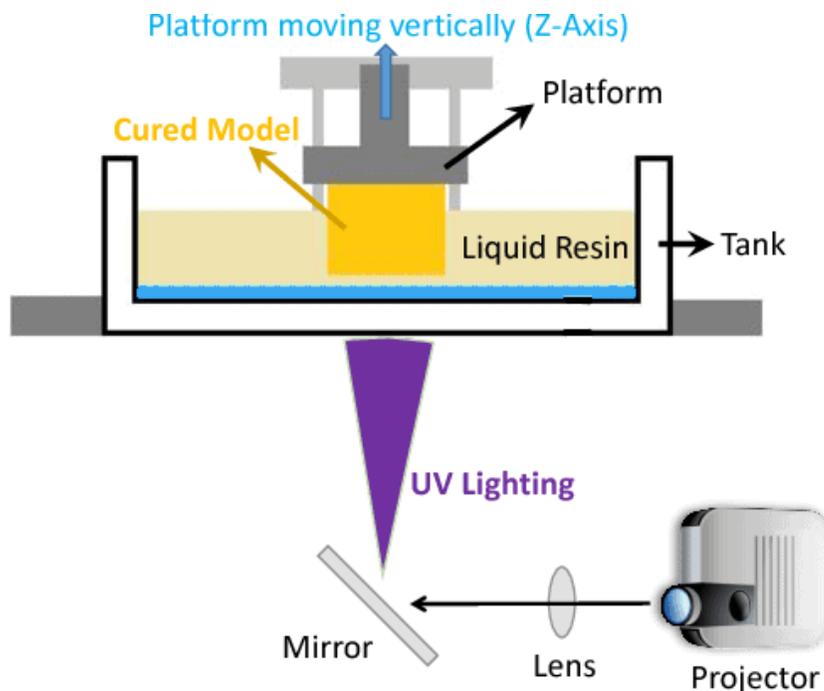
Nota. El esquema de la imagen muestra las partes y el proceso de una impresora 3D por fusión por lecho de polvo. Tomado de *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenge* por Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018).

Estereolitografía (SLA).

Este es el tipo de manufactura que se usará como parte en el desarrollo de la fundición del presente proyecto. La SLA consiste en imprimir resina que se encuentra dentro de un tanque transparente en donde por la actuación de una luz ultravioleta cura el material capa por capa hasta formar el sólido en 3D. (Pagac et al., 2021)

Figura 8

Esquema del proceso de una impresora 3D por estereolitografía



Nota. El esquema de la imagen muestra las partes y el proceso de una impresora 3D por estereolitografía. Tomado de Xometry *Europe* por Europe, 2022.

<https://xometry.eu/es/impresion-3d-por-estereolitografia-sla/>

Fundición por Cera Perdida en Joyería

La creación y manufactura de joyería a lo largo de los siglos ha requerido de manos habilidosas y un proceso complicado para la realización de joyas de gran valor. Es por esta razón que la tecnología de la fundición a la cera perdida fue desarrollada desde la antigüedad de manera independiente y paralela por los sumerios, indios, chinos, mesoamericanos e incas. Y que posteriormente sería adoptada por civilizaciones contemporáneas para la realización de formas complejas con delicados detalles en metal fundido; que consiste a breves rasgos en realizar un molde negativo en un material cerámico a partir de la pieza realizada en cera para que posteriormente al exponerse al calor pueda extraerse la cera e ingresar el metal fundido. (Possehl, s. f.).

Existen varios métodos para la realización de la fundición cera perdida de joyería.

Según (Sopcak 1986) uno de ellos consiste en:

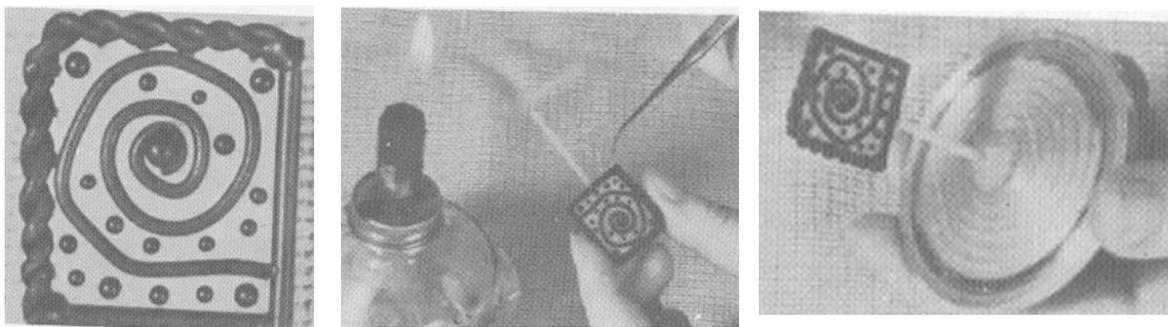
1. Realizar el modelo en cera que sea consumible

La preparación de la resina consumible en la joyería tiene varios pasos, que involucran el diseño y la construcción de la estructura. Para ello es común usar un mechero y herramientas como escarpelos.

Esta estructura dependiendo la forma y la complejidad debe poseer bebederos por donde entrará el metal fundido. Y es una parte crítica ya que, si el bebedero es muy largo, ocurrirá un preflujo y si es muy corto, hay la posibilidad de una fundición incompleta. Adicionalmente el bebedero deberá estar instalado en una base circular que puede ser de cualquier material ya sea aluminio, bronce, plástico, caucho, etc. Figura 9

Figura 9

Secuencia de fotografías de la realización de la pieza en cera



Nota. La primera imagen muestra el molde de cera, la segunda el molde con su bebedero y la última el molde en la base. Tomado de *Handbook of lost wax or investment casting* por Sopcak, J. E, 1986. Gem Guides Book Co.

2. Incorporar el modelo en un adecuado material refractario que soporte altas temperaturas y que reproduzca todos los detalles del modelo.

La estructura trabajada se introduce en un cubilete cilíndrico de acero inoxidable que vaya de 1 ½ a 3 pulgadas de altura y el diámetro irá de acuerdo con el tamaño de la pieza de fundición realizada como se muestra en la Figura 10

Figura 10

Comparación entre la pieza y el cubilete



Nota. La imagen muestra el tamaño de comparación que debería tener el cubilete de la pieza. Tomado de *Handbook of lost wax or investment casting* por Sopcak, J. E, 1986. Gem Guides Book Co.

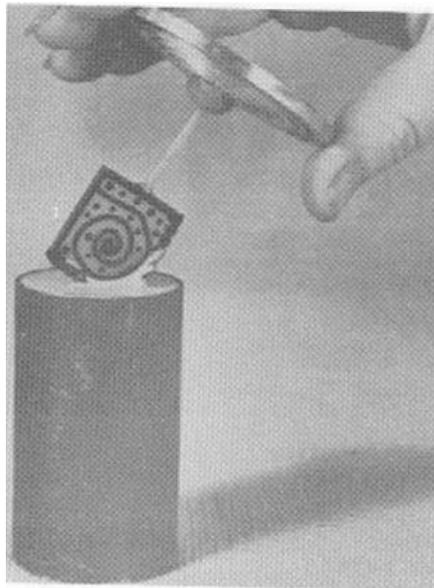
Luego se introduce la estructura dentro del cubilete, en donde se mide la cantidad de agua de acuerdo con el volumen que ocupe el 80% de la pieza. Si el cubilete mide 1 ¾ pulgadas de alto y 1 ½ pulgada de diámetro la cantidad recomendable de agua sería una onza. (Sopcak, 1986)

Se extrae el agua y se mezcla con el material cerámico en otro recipiente hasta crear una consistencia parecida a una mezcla de pan cake y se introduce en una cámara de vacío para que el material cerámico pueda compactarse y eliminar todas las burbujas en su interior

Posteriormente se ingresa la mezcla al cubilete hasta llenarlo. Durante la mezcla (Sopcak, 1986) recomienda que el frasco este sometido a una vibración para eliminar cualquier burbuja que haya quedado rezagada. Y se introduce la estructura de cera dentro del cubilete. Como se observa en la Figura 11

Figura 11

Introducción de la pieza al cubilete



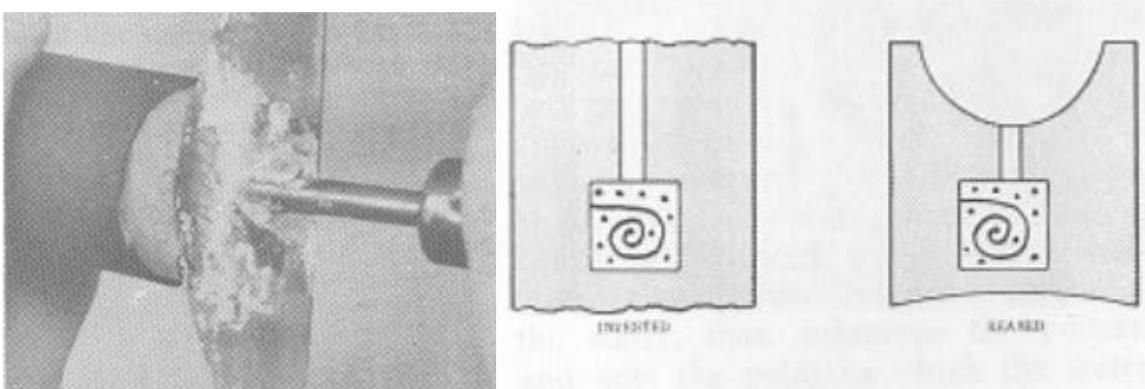
Nota. La imagen muestra el tamaño de comparación que debería tener el cubilete de la pieza. Tomado de *Handbook of lost wax or investment casting* por Sopcak, J. E, 1986. Gem Guides Book Co.

Seguidamente se deja reposar el cubilete finalizado por mínimo media hora. Esto es necesario para absorber cualquier residuo de agua que haya quedado.

Luego se remueve la base cilíndrica del cubilete y con la ayuda de una espátula, se realiza una superficie cóncava tal como se observa en la Figura 12

Figura 12

Realización de superficie cóncava en cubilete



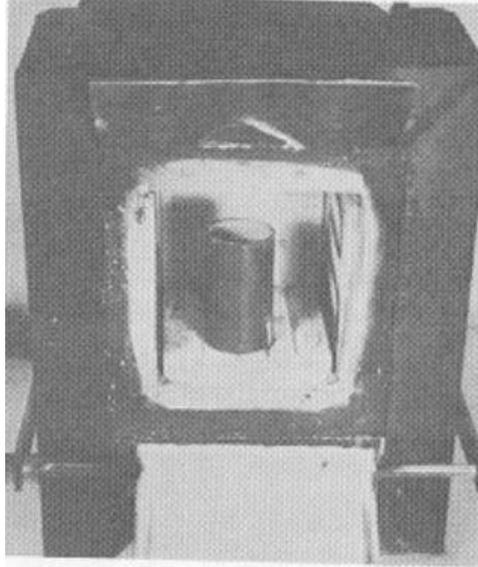
Nota. La imagen muestra el proceso de realización de una superficie cóncava que servirá de apoyo de reposo entrante para el material metálico. Tomado de *Handbook of lost wax or investment casting* por Sopcak, J. E, 1986. Gem Guides Book Co.

3. Quemar el modelo para que deje un molde negativo dentro del material refractario

La realización del quemado para eliminar la resina y endurecer el material cerámico depende del tipo que se esté usando respectivamente. Y para este proyecto se explicará posteriormente los detalles y el proceso de quemado que se usará en el proyecto

Figura 13

Cubilete ingresado en el horno para quemado



Nota. La imagen muestra el ingreso del cubilete en el horno para realizar el tratamiento térmico al material cerámico y a la resina. Tomado de *Handbook of lost wax or investment casting* por Sopcak, J. E, 1986. Gem Guides Book Co.

4. Fundición llenando el molde con el metal

Cuando el quemado termina y la resina ya se haya liberado, quedará el molde listo para el ingreso del metal fundido del cual se quiera realizar la joyería.

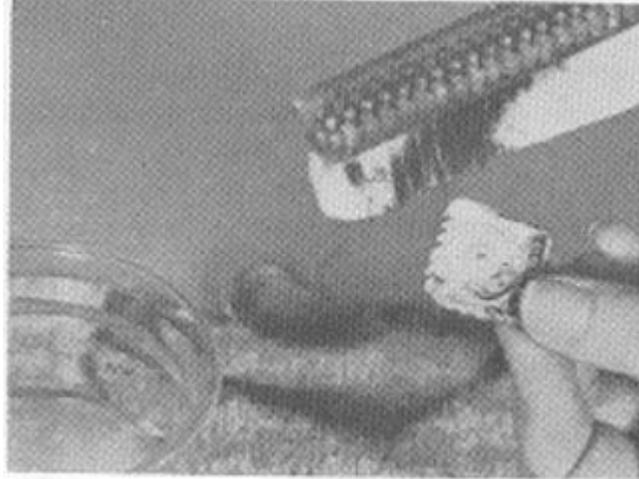
Para esta etapa también se requiere que se haga vacío en la parte inferior del cubilete, el cual ayudará a que el metal fundido llene todos los espacios del molde. (El proceso en general se detallará mejor en el capítulo siguiente, ya que se requiere parámetros específicos para este proceso)

5. Obtención del modelo metálico destruyendo el molde

Por último, se destruye el material cerámico y se obtiene la pieza fabricada. Figura 14

Figura 14

Fase de limpiado y extracción de la estructura



Nota. La imagen muestra el proceso de limpieza posterior a romper el molde de cerámica.

Tomado de *Handbook of lost wax or investment casting* por Sopcak, J. E, 1986. Gem Guides Book Co.

Industria 4.0 y el Big Data

El término industria 4.0 representa la cuarta revolución industrial. La cual fomenta que, a partir de la gran evolución en la tecnología existente, varias tendencias están conduciendo a la humanidad hacia modelos de digitalización y automatización tanto en procesos de; laboratorio, productivos, logísticos, control de calidad, investigaciones, etc. (Díaz, s. f.). Entre las tendencias más importantes de la industria 4.0, se encuentra:

- **Big data**, que es el análisis predictivo de un conjunto de datos de gran tamaño y velocidad de crecimiento que promete proporcionar un punto de referencia para que organizaciones puedan identificar problemas de una forma más comprensible, rápida y eficiente. Brindando de esta manera, ventajas como reducción de costos, eficiencia en toma de decisiones, capacidad para crear nuevos productos y servicios. (Big Data, s. f.)
- **Internet de las cosas**, según (AWS, s. f.). el término IOT se refiere a la red colectiva de dispositivos conectados en una red que facilita la comunicación entre ellos y la nube.

Hoy en día se cuenta con mucha de variedad de sensores y dispositivos inteligente que permiten el desarrollo colaborativo

- **Procesos visuales/realidad virtual** Se refiere a un entorno de escenas y objetos simulados que poseen apariencia real y permiten la percepción en 3D de un entorno generado a través de tecnología informática (Krueger, 1991)
- **Robótica, inteligencia artificial/aprendizaje automático** Se refiere a la capacidad de las máquinas para aprender sin ser expresamente programadas para una tarea en específico. (BBVA, 2019)
- **Reconocimiento de voz.** Esta es una herramienta informática una disciplina de la inteligencia artificial que permite la comunicación hablada entre hombre y máquina (CVC, 1992)
- **Computación en la nube/ Virtualización** también conocida como Cloud computing, se refiere al uso de servidores remotos que se conectan a internet para almacenar, administrar y procesar datos. Llegando a ser una estructura donde el software y hardware se integran virtualmente (Mell & Grance, 2011)

Cartas de Control y Calidad

La calidad es una característica deseable que debería poseer un producto o servicio y se ha convertido en un factor decisivo para el mundo y sus consumidores hoy en día.

(Montgomery, 2013), presenta 8 dimensiones de calidad: Desempeño, confiabilidad, durabilidad, facilidad de servicio, estética, características incluidas, calidad percibida y conformidad con los estándares (Garvin, 1998)

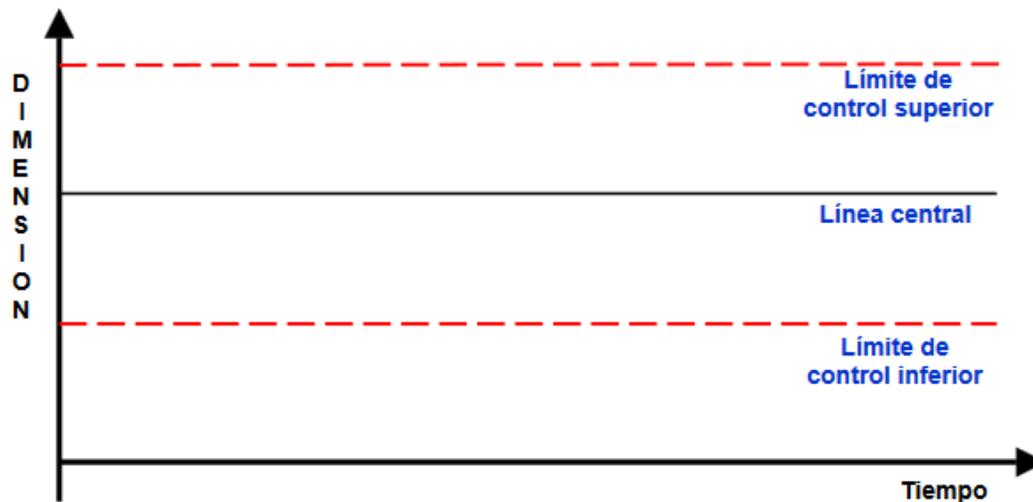
Las cartas de control son una herramienta que de acuerdo con la norma E2587 se utilizan para supervisar continuamente las características del producto o del proceso con el fin de determinar si un proceso se encuentra o no en un estado de control estadístico. Y que tiene

el fin de distinguir variaciones por causas comunes y especiales para caracterizar algún funcionamiento y decidir acciones de control y de mejora.

En la Figura 15, se muestra un ejemplo de grafica de control que consiste en una línea central LC y dos pares de líneas limites espaciadas por encima y por debajo de la línea central. Que se denominan; línea de control superior LCS y línea de control inferior LCI. (Mustafa, 2002)

Figura 15

Gráfico de control típico



Nota. La imagen muestra los parámetros de control de una carta. Tomado de *Control de calidad: Cartas de control por variables* por Mustafa, A. M., 2002.

Según las características de calidad, las categorías en donde caen las cartas de control se dividen en, control por variables y atributos. Si los datos que obtienen tienen características de medidas reales se construyen cartas de control por variables. En cambio, si los datos son características de calidad y no existe una medición continua, se construye una carta de control por atributos (Mustafa, 2002). Según la categoría existen: (Tabla 1)

Tabla 1*Graficas de control más utilizadas*

Tipo	Carta	Descripción	Campo de aplicación
	$\bar{x} - R$	Medias y rango	Control de características individuales.
Por variables	$\bar{x} - S$	Medias y desviación estándar	Control de características individuales.
	$\bar{x} - Rm$	Mediciones y rangos móviles	Control de un proceso con datos variables que no pueden ser muestreados en lotes o grupos.
	P	Proporción	Control del porcentaje de unidades defectuosas.
Por atributos	Np	Numero de defectuosos	Control del número de piezas defectuosas.
	C	Defectos	Control de número global de defectos por unidad.
	u	Promedio de defectos por unidad	Control del promedio de defectos por unidad.

Nota. La tabla muestra la división de cartas más utilizadas ya sea por variables o por atributos.

Recuperado de *Cartas De Control* por Cadenas, M. (s. f.).

<https://ingenieriaindustrialupvmtareasytrabajos.files.wordpress.com/2012/08/cartas-de-control-por-variables.pdf>

La carta de control que se usará en el desarrollo de este documento es la $\bar{x} - R$. En, (Montgomery, 2013) se detalla que una característica de la calidad tiene una distribución

normal con media μ y desviación estándar σ , donde tanto μ y σ son conocidas. Por lo que es correcto decir que si $x_1, x_2 \dots x_n$ es una muestra de tamaño n , su promedio vendría dado por:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Y si \bar{x} sigue una distribución normal con media μ y desviación estándar $\sigma_{\bar{x}} = \sigma/\sqrt{n}$, la probabilidad es de $1 - \alpha$ para que cualquier media muestral se localice entre:

$$\mu + Z_{\frac{\alpha}{2}} \sigma_{\bar{x}} = \mu + Z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad y \quad \mu - Z_{\frac{\alpha}{2}} \sigma_{\bar{x}} = \mu - Z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Siendo las ecuaciones anteriores, los límites de control superior e inferior para carta de control de medias muestrales si μ y σ son conocidos. Sin embargo, en la práctica, los valores de μ y σ son desconocidos, por lo que estos se estiman a partir de muestras m o subgrupos tomados cuando el proceso está bajo control. Todos los subgrupos tomados contienen n observaciones. Sean $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$ los promedios de cada subgrupo. Entonces el promedio del proceso es:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_m}{m}$$

Siendo esta $\bar{\bar{x}}$ la línea central CL en la carta \bar{x} . A partir de esto las fórmulas para construir los límites de control de esta carta son:

- Línea central superior $LCS = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R}$
- Línea Central $LC = \bar{\bar{x}}$
- Línea central inferior $LCI = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}$

Si $x_1, x_2 \dots x_n$ es una muestra de tamaño n , entonces el rango de la muestra es la diferencia en las observaciones mayor y menor (Montgomery, 2013). $R = x_{\max} - x_{\min}$ Sean R_1, R_2, \dots, R_m los rangos de las m muestras. El rango promedio es:

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m}$$

La variabilidad del proceso puede monitorearse graficando los valores de rango muestral R en una carta de control, con las siguientes fórmulas para la carta de control R

- Línea central superior $LCS = D_4 \bar{R}$
- Línea Central $LC = \bar{R}$
- Línea central inferior $LCI = D_3 \bar{R}$

Nota. A_2 , D_4 y D_3 son constantes que dependen del tamaño de muestra n . Y se pueden obtener de la tabla de factores ya pre – calculada (Figura 16) para construcción de cartas de control.

Figura 16

Factores para la construcción de una carta de control de variables

Observations in Sample, n	Chart for Averages					Chart for Standard Deviations						Chart for Ranges					
	Factors for Control Limits			Factors for Center Line		Factors for Control Limits				Factors for Center Line		Factors for Control Limits					
	A	A_2	A_3	c_4	$1/c_4$	B_3	B_4	B_5	B_6	d_2	$1/d_2$	d_3	D_1	D_2	D_3	D_4	
2	2.121	1.880	2.659	0.7979	1.2533	0	3.267	0	2.606	1.128	0.8865	0.853	0	3.686	0	3.267	
3	1.732	1.023	1.954	0.8862	1.1284	0	2.568	0	2.276	1.693	0.5907	0.888	0	4.358	0	2.574	
4	1.500	0.729	1.628	0.9213	1.0854	0	2.266	0	2.088	2.059	0.4857	0.880	0	4.698	0	2.282	
5	1.342	0.577	1.427	0.9400	1.0638	0	2.089	0	1.964	2.326	0.4299	0.864	0	4.918	0	2.114	
6	1.225	0.483	1.287	0.9515	1.0510	0.030	1.970	0.029	1.874	2.534	0.3946	0.848	0	5.078	0	2.004	
7	1.134	0.419	1.182	0.9594	1.0423	0.118	1.882	0.113	1.806	2.704	0.3698	0.833	0.204	5.204	0.076	1.924	
8	1.061	0.373	1.099	0.9650	1.0363	0.185	1.815	0.179	1.751	2.847	0.3512	0.820	0.388	5.306	0.136	1.864	
9	1.000	0.337	1.032	0.9693	1.0317	0.239	1.761	0.232	1.707	2.970	0.3367	0.808	0.547	5.393	0.184	1.816	
10	0.949	0.308	0.975	0.9727	1.0281	0.284	1.716	0.276	1.669	3.078	0.3249	0.797	0.687	5.469	0.223	1.777	
11	0.905	0.285	0.927	0.9754	1.0252	0.321	1.679	0.313	1.637	3.173	0.3152	0.787	0.811	5.535	0.256	1.744	
12	0.866	0.266	0.886	0.9776	1.0229	0.354	1.646	0.346	1.610	3.258	0.3069	0.778	0.922	5.594	0.283	1.717	
13	0.832	0.249	0.850	0.9794	1.0210	0.382	1.618	0.374	1.585	3.336	0.2998	0.770	1.025	5.647	0.307	1.693	
14	0.802	0.235	0.817	0.9810	1.0194	0.406	1.594	0.399	1.563	3.407	0.2935	0.763	1.118	5.696	0.328	1.672	
15	0.775	0.223	0.789	0.9823	1.0180	0.428	1.572	0.421	1.544	3.472	0.2880	0.756	1.203	5.741	0.347	1.653	
16	0.750	0.212	0.763	0.9835	1.0168	0.448	1.552	0.440	1.526	3.532	0.2831	0.750	1.282	5.782	0.363	1.637	
17	0.728	0.203	0.739	0.9845	1.0157	0.466	1.534	0.458	1.511	3.588	0.2787	0.744	1.356	5.820	0.378	1.622	
18	0.707	0.194	0.718	0.9854	1.0148	0.482	1.518	0.475	1.496	3.640	0.2747	0.739	1.424	5.856	0.391	1.608	
19	0.688	0.187	0.698	0.9862	1.0140	0.497	1.503	0.490	1.483	3.689	0.2711	0.734	1.487	5.891	0.403	1.597	
20	0.671	0.180	0.680	0.9869	1.0133	0.510	1.490	0.504	1.470	3.735	0.2677	0.729	1.549	5.921	0.415	1.585	
21	0.655	0.173	0.663	0.9876	1.0126	0.523	1.477	0.516	1.459	3.778	0.2647	0.724	1.605	5.951	0.425	1.575	
22	0.640	0.167	0.647	0.9882	1.0119	0.534	1.466	0.528	1.448	3.819	0.2618	0.720	1.659	5.979	0.434	1.566	
23	0.626	0.162	0.633	0.9887	1.0114	0.545	1.455	0.539	1.438	3.858	0.2592	0.716	1.710	6.006	0.443	1.557	
24	0.612	0.157	0.619	0.9892	1.0109	0.555	1.445	0.549	1.429	3.895	0.2567	0.712	1.759	6.031	0.451	1.548	
25	0.600	0.153	0.606	0.9896	1.0105	0.565	1.435	0.559	1.420	3.931	0.2544	0.708	1.806	6.056	0.459	1.541	

Nota. Recuperado de *Introduction to statistical quality control* por Montgomery, D. C. (2013).

Wiley.

Capítulo III: Parámetros de Fundición

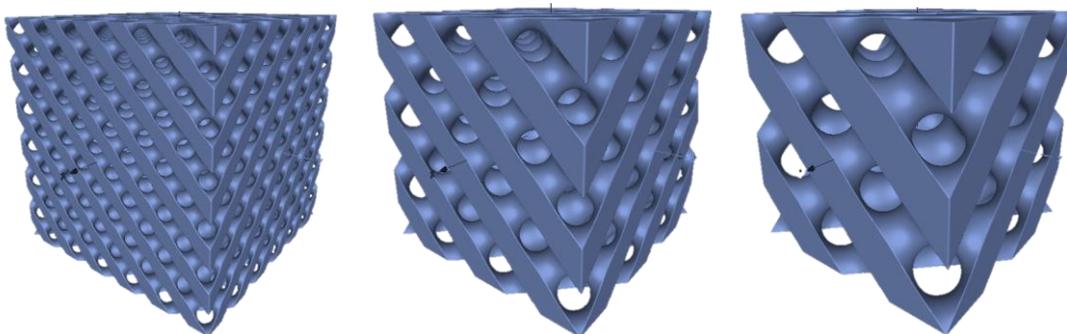
Para la fundición por cera perdida de la TPMS, se ha planteado seguir los pasos recomendados de la fundición en joyería. Para ello es necesario evaluar los parámetros involucrados en las fases in situ. Los cuales son:

Diseño y Modelamiento de TPMS

Para el modelamiento de la TPMS se usó software libre tal como Mathmod, Meshlab, gmsh, etc. Estos se encuentran más detallados en (Trujillo, 2023). Quien de forma experimental diseñó y encontró a la TPMS en forma de diamante, un mejor rendimiento y eficiencia. Esta TPMS de dimensiones 30x30x30mm considera 2 características principales para su rendimiento, las cuales son: Longitud de celda unitaria (L) y porosidad (n). La porosidad más eficiente encontrada fue de 0.5 y para la longitud de celda unitaria se tomó en cuenta 3 valores que son 5, 10 y 15. Figura 17

Figura 17

TPMS consideradas para la fundición



Nota. La primera imagen representa la TPMS L5, la segunda la L10 y la tercera la L15. Tomado de Establecimiento de los dominios físicos a partir de estructuras TPMS matemáticamente definidas para obtener intercambiadores de calor compactos reconfigurables. Por Trujillo Freire, I. (2023). ESPE.

Los bebederos también son un factor importante, ya que son la entrada del material metálico al molde. Por lo que, para la implementación de los bebederos en las TPMS, se consideró la metodología de diseño de (Prasad, 2012), en donde se divide la estructura en partes pequeñas para analizar que secciones presentan mayor dificultad para el llenado y cuál de estas, se solidificarán más rápido, para de esta manera saber dónde y con qué medidas ubicar los bebederos. Al usar esta metodología en los TPMS, el número de bebederos al menos de la TPMS L5 (que corresponde a la TPMS con mayor volumen y complicación) es relativamente muy grande. Así que en una buena práctica (Veintimilla, 2023), planteó la selección del número de estos, calculando un 75% y 50% del número de alimentadores que se espera al ser calculado.

Con todos estos parámetros se estableció los 3 factores que se presentarán a continuación. En donde (Veintimilla, 2023) realizó un diseño experimental de taguchi (DOE). Con el fin de buscar el mejor método para fundir una estructura TPMS.

- *Factor A: Temperatura del molde durante la fundición.* La temperatura a la que se empieza a verter el metal es un factor importante de calidad, ya que el material cerámico puede obtener características de fragilidad o dureza.
- *Factor B: Sistema de alimentación.* Como se detalló anteriormente en el proceso de fundición por cera perdida. Los bebederos son el canal por el cual el metal ingresa al molde. Por lo tanto, el número de estos es un factor importante de desempeño para una correcta fundición
- *Factor C: Longitud de celda unitaria.* En el funcionamiento real, es necesario determinar cuál de las 3 estructuras (L5, L10, L15) se funde con una mejor calidad y tiene una mejor eficiencia en su funcionamiento.

El modelo experimental de arreglo L₉, fue planteado de la forma que se muestra en la Tabla 2

Para la validación del experimento se realizaron 2 repeticiones, por lo que en total se tendría 18 fundiciones.

Tabla 2

Modelo experimental de Taguchi

Temp	DSA	L
Factor A	Factor B	Factor C
150	1,00	5
150	0,75	10
150	0,50	15
345	1,00	10
345	0,75	15
345	0,50	5
540	1,00	15
540	0,75	5
540	0,50	10

Nota. La tabla muestra las estructuras a fundir con los distintos parámetros del DOE. Extraído de *Fundición de estructuras TPMS por cera perdida* Por Veintimilla Fabricio, 2023. ESPE.

Impresión

Para la impresión se hizo uso de la manufactura aditiva por estereolitografía (SLA), empleando la impresora Form3 de formlabs de la universidad de las fuerzas armadas ESPE. Y una resina cuyo porcentaje de cera sea consumible. Estas son, la WAX resin y WAX 40 resin.

Form3

La impresora form3 es una impresora 3D(Figura 18) de resina por estereolitografía que posee una calidad industrial con tecnología LFS (Low Force Stereolithography). Tecnología que usa un tanque de resina flexible para reducir significativamente fuerzas de pelado durante la impresión y una unidad de procesamiento de luz (LPU) con motor óptico cerrado de diseño personalizado. (4 Ways LFS 3D Printing Produces Better Parts, s. f.)

Figura 18*Impresora 3D Form3*

Nota. La imagen muestra la impresora que se usó para imprimir la estructura en 3D. Tomado de *Form 3+:* Una impresora 3D SLA de sobremesa de calidad industrial Formlabs.

<https://formlabs.com/latam/3d-printers/form-3/>

Casteable WAX 40

La resina WAX 40 es la resina propia de formlabs comúnmente usada por los joyeros para realizar piezas de gran complejidad y tamaño con una resolución de impresión de capa de entre 25 y 50 micras.

Esta resina contiene 40% de cera («materiales» s. f.). Posee las propiedades mostradas en la Tabla 3

El fabricante recomienda el tratamiento térmico de la Figura 19 para evitar la expansión. Al cual se le da lugar cuando se va a consumir la resina.

Tabla 3

Información de las propiedades de la resina

Propiedades de quemado

Temperatura al 5% de pérdida de masa	249 °C
Contenido de cenizas	0.0-0.1%

Nota. La tabla muestra información sobre las propiedades de la resina WAX 40 para el proceso de quemado. Tomado de *Materiales Formlabs*. <https://formlabs.com/latam/3d-printers/form-3/>

Figura 19

Información de las de las fases de quemado para la resina

		FASE	TIEMPO	PROGRAMA °C	PROGRAMA °F
	Reposo en calor Coloca las cajas de moldeo en el horno para un secado en calor después del período de reposo del revestimiento (30-60 min). La temperatura elevada derrite la cera sólida en la resina para reducir la expansión.	Mantenimiento	180 minutos	55 °C	131 °F
A	Transición térmica El bebedero de cera se derrite y aumenta el flujo de aire en el patrón de resina. La cera en la resina acaba en el revestimiento. El quemado comienza con suavidad, descomponiendo el patrón sin una expansión violenta.	Rampa	48 minutos	2 °C/min	3,6 °F/min
		Mantenimiento	180 minutos	150 °C	302 °F
		Rampa	75 minutos	2,0 °C/min	3,6 °F/min
		Mantenimiento	180 minutos	300 °C	572 °F/min
B	Quemado Elimina la resina y la ceniza restantes en el revestimiento para fundición.	Rampa	108 minutos	4,0 °C/min	7,2 °F/min
		Mantenimiento	180 minutos	732 °C	1350 °F
C	Temperatura de fundición Enfría las cajas de moldeo hasta la temperatura de fundición del metal seleccionado.	Rampa	44 minutos	-5 °C/min	-9 °F/min
		Ventana de fundición	Hasta 2 horas	Temperatura de fundición deseada	Temperatura de fundición deseada



Nota. La figura muestra las fases a la cual debe ser programado el horno para realizar el quemado de la resina y la gráfica en plano cartesiano que muestra el proceso. Tomado de *Materiales Formlabs*. <https://formlabs.com/latam/3d-printers/form-3/>

Castable Wax Resin

Esta, a diferencia de la anterior es una resina con 20% de cera para una fundición fiable sin ceniza y un quemado limpio y con gran precisión. Posee una resolución de impresión de capa de entre 25 a 50 micras. (materiales, s. f.) Con las propiedades mostradas en la Tabla 4.

Tabla 4

Información de las de las fases de quemado para la resina

<i>Propiedades de tracción</i>	<i>Valor</i>
Resistencia a la rotura por tracción	12 MPa
Módulo de tracción	220 MPa
Alargamiento	13%
<i>Propiedades de quemado</i>	
Temperatura al 5% de pérdida de masa	249 °C
Contenido de cenizas	0.0-0.1%

Nota. La tabla muestra información sobre las propiedades de la resina WAX Resin para el proceso de quemado. Tomado de *Materiales Formlabs*. <https://formlabs.com/latam/3d-printers/form-3/>

El fabricante recomienda el tratamiento térmico de la

Figura 20 para evitar la expansión y ofrecer la mayor resistencia de revestimiento posible y completar el quemado de los detalles más finos usando Certus Prestige Optima u otros materiales de revestimiento similares.

Figura 20

Información de las de las fases de quemado para la resina

	FASE	TIEMPO	PROGRAMA °C	PROGRAMA °F
A	Inserción de las cajas de moldeo	0 min	21 °C	70 °F
	Rampa	60 min	4,7 °C / min	8,4 °F / min
	Mantenimiento	480 min	300 °C	572 °F
B	Rampa	100 min	4,5 °C / min	8,1 °F / min
	Mantenimiento	180 min	750 °C	1382 °F
C	Rampa	60 min	-4,0 °C / min	-7,1 °F / min
	Ventana de fundición	Hasta 2 horas	512 °C (o la temperatura de fundición deseada)	954 °F (o la temperatura de fundición deseada)

Nota. La figura muestra las fases a la cual debe ser programado el horno para realizar el quemado de la resina y la gráfica en plano cartesiano que muestra el proceso Tomado de *Materiales Formlabs*. <https://formlabs.com/latam/3d-printers/form-3/>

Material Cerámico

El material cerámico que se escogió para servir de molde en la fundición es yeso de la marca CERTUS que proporciona consistentemente superficies de colada superiores y ultralisas para una variedad de materiales de patrones actuales, incluyendo: Ceras de inyección estándar, Ceras de talla y Patrones de resina (DLP, SLA) (Certus Investment Powder Technologies Co., Ltd., s. f.). Para el mezclado, el fabricante recomienda que haya entre un 38 a 40 % de agua en la mezcla y que todo el proceso de mezclado dure máximo 8 minutos. Este proceso consta de las fases detalladas en la Tabla 5

Tabla 5

Información de las fases de mezclado de material cerámico

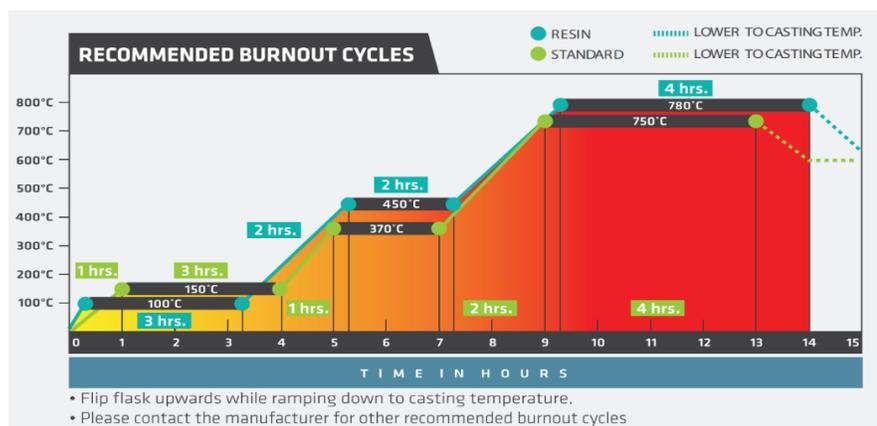
Proceso	Tiempo
Mezclado de material cerámico	Minutos
Pesar polvo con precisión	-----
Añadir polvo al agua	-----
Mezclado	5
Vertimiento en el cubilete	2
Exposición al vacío	1
Tiempo total de trabajo	8

Nota. La tabla muestra las fases a la cual debe ser sometido el material cerámico CERTUS antes de ingresar al horno. Tomado de *Certus Investment Powder Technologies Co.* por Certus, 2009. <http://certus-int.com/>

El tratamiento térmico que recomienda el fabricante para el cocido del yeso se muestra en la Figura 21

Figura 21

Información de las fases de quemado de yeso



Nota. La imagen muestra las fases a la cual debe ser sometido el material cerámico CERTUS durante el quemado. Tomado de *Certus Investment Powder Technologies Co.* por Certus, 2009. <http://certus-int.com/>

Metal de Fundición

Para la selección del material de fundición (Veintimilla 2023), aplico la metodología de (Ashby & Cebon, 1993), la cual consta de las etapas de: traducción filtrado, clasificación y documentación; En la Tabla 6 se plantea el resumen de la etapa de traducción del problema

Tabla 6

Etapas de traducción del problema se selección de material para el intercambiador TPMS

Parte	Definición
Función	Transferir la mayor cantidad de calor desde una base caliente hacia la estructura TPMS.
Restricciones	<p><i>No negociables</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Alto coeficiente de conductividad térmica • Bajo coeficiente de expansión térmica • Buena colabilidad para la fundición • Disponibilidad en Ecuador <p><i>Negociables</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Económico • Temperatura máxima de servicio al menos de 300 °C
Objetivos	Maximizar la relación entre la conductividad térmica y el coeficiente de expansión térmica
VARIABLES LIBRES	Selección del material.

Nota. Extraído de *Fundición de estructuras TPMS por cera perdida* Por Veintimilla Fabricio, 2023. ESPE.

Para encontrar el índice del material, se plantea encontrar el flujo de calor hacia una pared por convección (W/m^2), que se describe de la siguiente forma:

$$q = h * \Delta T$$

Donde:

- h es el coeficiente de transferencia de calor
- ΔT es la caída de temperatura

La conducción se describe mediante la ecuación de conducción que toma la forma. (Bergman et al., 2017)

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{x}$$

Donde

- λ es la conductividad térmica de la pared
- x es el grosor de la pared
- ΔT es la diferencia de temperatura

Se calcula La continuidad del flujo de calor de la siguiente manera (se requiere resistencia 1/U):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{x}{\lambda}$$

Donde

- U es el coeficiente de transferencia de calor total

El número de Biot es un número adimensionales utilizado para encontrar el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la pared y el fluido que circula sobre el cuerpo (Ashby & Cebon, 1993). Esta formulado como

$$B_i = \frac{hL_c}{\lambda}$$

Donde

- B_i es el número de Biot que se usa para sólidos, h es el coeficiente de transferencia de calor, λ es la conductividad térmica y L_c es una longitud característica del sólido.

De aquí se obtiene que

$$h = \frac{B_i \lambda}{L_c}$$

Al reemplazar en el coeficiente de transferencia de calor total se obtiene:

$$U = \frac{B_i \lambda}{L_c + B_i x}$$

El flujo de calor viene dado por

$$q = U \Delta T$$

La expansión térmica viene dada por

$$\alpha = \frac{1}{x} \frac{\Delta x}{\Delta T}$$

Despejando ΔT

$$\Delta T = \frac{\Delta x}{\alpha x}$$

Reemplazando

$$q = \frac{\lambda}{\alpha} \left(\frac{B_i \Delta x}{L_c x + B_i x^2} \right)$$

El objetivo según (Veintimilla, 2023) para maximizar el flujo de calor total por unidad de área, por lo que:

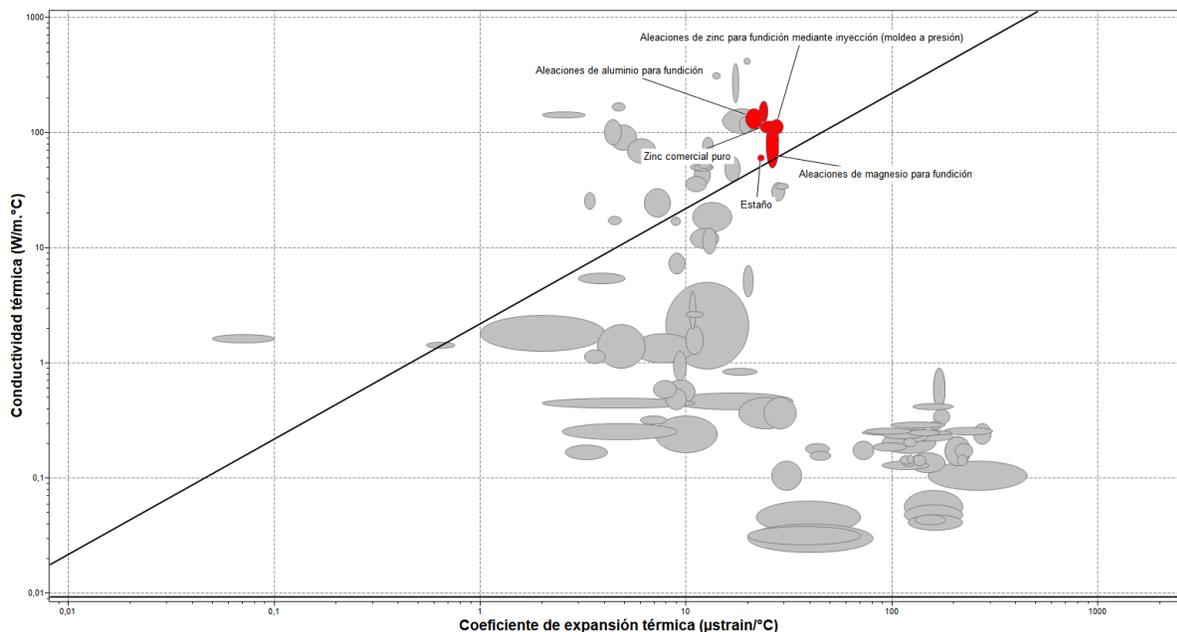
$$Q = qA \rightarrow \frac{Q}{A} = q \rightarrow \frac{Q}{A} = \frac{\lambda}{\alpha} \left(\frac{B_i \Delta x}{L_c x + B_i x^2} \right)$$

De donde el término que describe la propiedad térmica es λ/α .

Con esta parámetro y las condiciones planteadas anteriormente, se buscó en el software CES Edupack 2019, los materiales que podrías ser bueno candidatos, de acuerdo con un filtrado de: Colabilidad del material; se seleccionó 5. (En una escala de 1 a 5 donde uno es proceso no recomendado y 5 excelente procesabilidad) y un punto de fusión no mayor a los 1000 °C

Figura 22

Gráfico de conductividad térmica vs. Coeficiente de expansión térmica materiales aplicando filtros



Nota. La imagen muestra el filtrado de materiales del software CES, tomando en cuenta el *conductividad térmica vs. Coeficiente de expansión*. Tomado de *Fundición de estructuras TPMS por cera perdida* Por Veintimilla Fabricio, 2023. ESPE.

La Tabla 7, muestra los materiales que se obtuvieron en el Software CES con sus distintas características. Como se puede observar la mejor opción con un menor índice de relación costo vs índice de material, es la aleaciones de aluminio.

Tabla 7

Materiales preseleccionados para el intercambiador TPMS

Materiales	Conductividad térmica ($\frac{W}{m^{\circ}C}$)	Coeficiente de expansión térmica ($\frac{\mu strain}{^{\circ}C}$)	Índice de material $\frac{\lambda}{\alpha}$	Costo aprox.* \$/kg	Relación costo vs índice de material
Aleaciones de aluminio	162	23.3	6.95	2.56	0.368
Aleaciones de magnesio	125	28	4.46	2.58	0.578
Aleaciones de zinc	129	29.3	4.40	3.90	0.886
Estaño	61.5	23.5	2.61	18.7	7.164
Zinc puro	125	28	4.46	2.77	0.621

Nota. Extraído de *Fundición de estructuras TPMS por cera perdida* Por Veintimilla Fabricio, 2023. ESPE.

Capítulo IV: Sensor y Acondicionamiento

Identificación de Parámetros

El objetivo principal de este documento es la realización del monitoreo in-situ de la fundición por cera perdida de la estructura TPMS. Para ello se analizó el esquema propuesto de la fundición por cera perdida que se observa en la **Figura 2**

Las fases involucradas, que requieren un análisis de datos, se presentan en:

- Cocido de material cerámico (yeso) con el molde impreso por estereolitografía
- Ingreso del metal al molde cerámico

Esto ya que se requiere una observación y una extracción de datos, primero para verificar que el horno este siguiendo el esquema de tratamiento térmico de la resina correctamente y su comportamiento a través del tiempo. Y segundo para recolectar datos de la temperatura del cubilete durante el ingreso del aluminio en el mismo.

Por lo tanto, ya que se requiere una detección y un seguimiento de datos a temperaturas muy altas (850°C) se necesita, un sensor que resista estos límites. Y una tarjeta de adquisición datos que pueda conectarse al internet y dar datos correctos en un determinado tiempo.

Sensor de Temperatura (Termopar Tipo K)

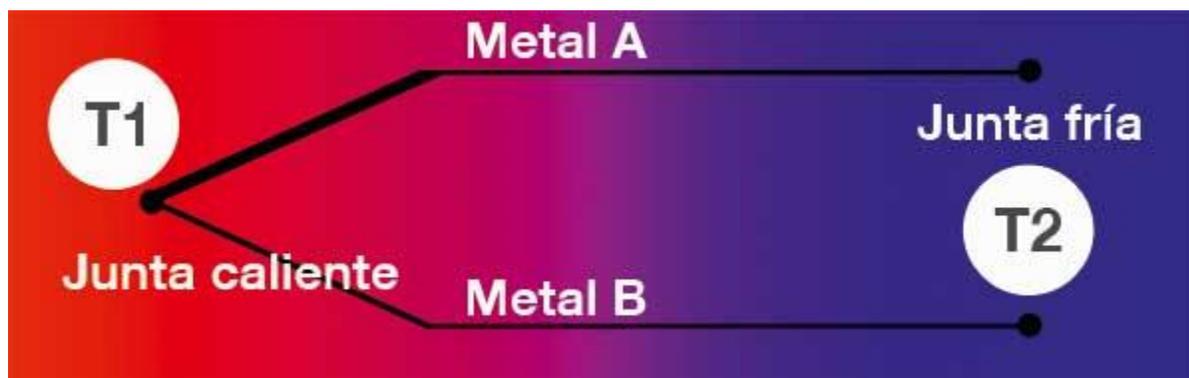
Como se mencionó anteriormente, se requiere un sensor que pueda soportar hasta los 820 °C. Para tener un factor de seguridad, se seleccionó un sensor que pueda trabajar al sobrepasar los 900 °C; por lo que una buena opción es optar por un termopar.

Un termopar es un sensor para medir temperatura que consiste en 2 metales diferentes unidos por un extremo. («Termopar: Tipos y Aplicaciones», s. f.) Cuando la unión de estos 2 metales se calienta o se enfría, produce una tensión eléctrica aproximadamente proporcional a la temperatura medida. Esta tensión se debe a 2 factores: la densidad de electrodos diferentes

de los dos materiales y de la diferencia de temperatura entre punto caliente y punto frío. Lo que quiere decir que un termopar no mide la temperatura absoluta, sino la temperatura entre la junta caliente (T1) y la junta fría (T2). Figura 23(«Cómo funciona un termopar», s. f.)

Figura 23

Partes de un termopar



Nota. La imagen muestra las partes que posee un termopar entre sus 2 juntas. Tomado de *Cómo funciona un termopar*. <https://www.bloginstrumentacion.com/productos/temperatura/cmo-funciona-termopar/>

Tipos de termopares

Los termopares más conocidos y económicos son los tipo J, K, T y E. Estos son más conocidos en aplicaciones industriales con poca exigencia de exactitud. Hay también los termopares tipo R, S y B que se utilizan en aplicaciones con temperaturas demasiado elevadas.

En la Figura 8 se encuentran las características de cada uno de los mencionados

Tabla 8

Características y tipos de termopares

Tipo	Material	Temp Max en C	Aplicaciones
K	NiCr-Ni	1000	Atmósferas oxidantes o de gas
	(NiCr-NiAl)	1200	inerte. Elevada resistencia a oxidación. Es la versión más utilizada.
T	Cu-CuNi	350	Atmósferas oxidantes, reductoras o de gas inerte en medios con temperaturas bajo cero. Aplicaciones típicas: criometría (bajas temperaturas), industrias de la refrigeración, química y petroquímica.
J	Fe-CuNi	750	Vacío, atmósferas oxidantes y reductoras o atmósferas de gas inerte. Centrales eléctricas e industrias en general, como la metalurgia y la petroquímica.
S	PT-RH	1600	Atmósferas oxidantes o de gas inerte.
N	NiCrSi-NiSi	1000	Muy exactas con altas temperaturas.
		1200	aplicaciones que requieren una mayor vida útil y mayor estabilidad.

Tipo	Material	Temp Max en C	Aplicaciones
R	Pt13%Rh	1600	Uso continuo en atmósferas oxidantes o de gas inerte
E	NiCr-CuN	900	Atmósferas oxidantes o de gas inerte. Excelente potencia termoeléctrica, es decir, elevada relación que entre milivoltios generados y variación de temperatura de un grado Celsius.
B	Pt30%Rh – Pt6%Rh	1700	Óptimo para vainas cerámicas cerradas en un extremo

Nota. La tabla muestra las características de los termopares y sus aplicaciones. Tabla extraída de Tomado de *Cómo funciona un termopar*.

<https://www.bloginstrumentacion.com/productos/temperatura/cmo-funciona-termopar/>

Según las características vistas en la Tabla 8, el sensor más adecuado para la aplicación es el termopar tipo K ya que tiene una elevada resistencia a la oxidación y es muy versátil.

El sensor cuenta con un módulo llamado MAX6675 y es exclusivo para el termopar tipo K ya que convierte la señal analógica a digital con una excelente resolución de 12 bits en un rango de 0 a 1023 °C («Transmisor MAX6675 para Termocupla K», s. f.).

Especificaciones Técnicas

- Voltaje de operación: 5V DC

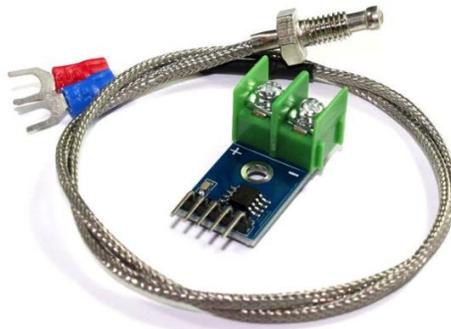
- Corriente de trabajo: 50mA
- Rango de Temperaturas Termocupla K: -200°C hasta 1300°C
- Resolución Transmisor MAX6675: 12 bits (0°C - 1023°C)
- Rango de temperatura MAX6675: 0° - 1023°C
- Resolución de temperatura: 0.25°C
- Interfaz de comunicación: SPI
- Posee agujeros para montaje
- Dimensiones: 25*15*13 mm
- Tiempo de respuesta: 170 a 220 ms

Conexión

- GND: 0V, Tierra
- VCC: +5V
- SCK: Señal de reloj de la interfaz SPI
- CS: Chip select o señal de habilitación de esclavo SPI
- SO: Salida de datos seriales

Figura 24

Sensor de temperatura termopar tipo K y modulo MAX6675



Nota. La tabla muestra las características de los termopares y sus aplicaciones. Tabla extraída de Tomado de *Cómo funciona un termopar*.

<https://www.bloginstrumentacion.com/productos/temperatura/cmo-funciona-termopar/>

Sensor de Temperatura y Humedad Ambiental

Para tener un espectro más amplio de datos, se resolvió también detectar la temperatura ambiental a la cual está sometido el cubilete en todas las fases. Para ello una opción económica y viable es el módulo de temperatura DHT11, este es un sensor de temperatura y humedad con salida digital calibrada. A nivel de software se dispone de librerías para Arduino con soporte para el protocolo "Single bus". En cuanto al hardware, solo es necesario conectar el pin VCC de alimentación a 3-5V, el pin GND a Tierra (0V) y el pin de datos a un pin digital en el Arduino o ESP32. (Sensor de temperatura y humedad relativa DHT11, s. f.)

Aunque el dht11 es un dispositivo analógico, dentro del mismo modulo se hace la conversión a digital. Los datos convertidos, conforman una trama de 40 bits que corresponde a los datos de temperatura y humedad Dht11

Como se observa en la figura 25 el primer grupo de 8 bits corresponde a la parte entera de la humedad y el segundo grupo corresponde a la parte decimal. De forma similar ocurre con el tercer y cuarto grupo que corresponden a la parte entera y decimal de la temperatura respectivamente. El último grupo de datos corresponden a los bits de paridad para confirmar si no hay datos corruptos. («Cómo utilizar el DHT11 para medir la temperatura y humedad con Arduino» 2017)

Figura 25

Sensor de temperatura termopar tipo K y modulo MAX6675

0011 0101 0000 0000 0001 1000 0000 0000 0100 1001
8 bits humedad **8 bits humedad** **8 bits temperatura** **8 bits temperatura** **bits de paridad**

Nota. La imagen muestra los grupos de bits que maneja un DHT11. *Tomado de Cómo utilizar el DHT11 para medir la temperatura y humedad con Arduino, 2017.* <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/sensor-dht11-temperatura-humedad-arduino/>

Especificaciones Técnicas

- Voltaje de Operación: 3V - 5V DC
- Corriente de trabajo: 2.5 mA
- Rango de medición de temperatura: 0 a 50 °C
- Precisión de medición de temperatura: ± 2.0 °C
- Resolución Temperatura: 0.1°C
- Rango de medición de humedad: 20% a 90% RH.
- Precisión de medición de humedad: 5% RH.
- Resolución Humedad: 1% RH
- Tiempo de respuesta: 1 s.
- Interfaz digital: Single-bus (bidireccional)
- Modelo: DHT11
- Dimensiones: 16*12*5 mm
- Peso: 1 gr.
- Carcasa de plástico celeste

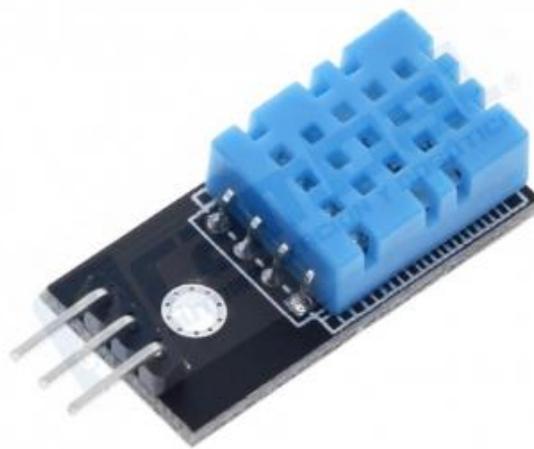
Conexión

- Alimentación: +5V (VCC)
- Datos (DATA)

- Tierra (GND)

Figura 26

Sensor de temperatura DHT11



Nota. La imagen muestra al sensor de temperatura y humedad DHT11. *omado de* *Cómo utilizar el DHT11 para medir la temperatura y humedad con Arduino, 2017.* <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/sensor-dht11-temperatura-humedad-arduino/>

Tarjeta de Adquisición de Datos

Para la adquisición de datos fue necesario pensar en una tarjeta que cuente con wifi ya que uno de los objetivos del monitoreo in situ es que la plataforma pueda ser de tipo lot.

En el mercado se encuentran distintos tipos de tarjeta que cuentan con esta característica. Entre los más utilizados son: ESP32 y ESP8266. De las cuales se hace una comparación rápida en la Tabla 9

Tabla 9

Tabla comparativa entre la Tarjeta ESP32 y ESP8266

Módulo	ESP32	ESP8266
Velocidad de wifi	hasta 150 Mbps	hasta 72.2 Mbps
SRAM	512 kB	120 kB
Núcleos	Dual Core	Single Core
Costo	\$ 13	\$ 9.5

Nota. La tabla compara las características más importantes para el proceso. Los precios fueron tomados de con referencia a mercado libre.

Aunque la ESP8266 es más barata, se prefiere el uso de la tarjeta ESP32, debido a su rapidez de procesamiento en el CPU y a su velocidad de internet.

La ESP32 es un módulo de bajo costo y consumo. Se basa en un microprocesador de uno o dos nodos con una frecuencia de operación de hasta 240 MHz. Algunas de sus características son:

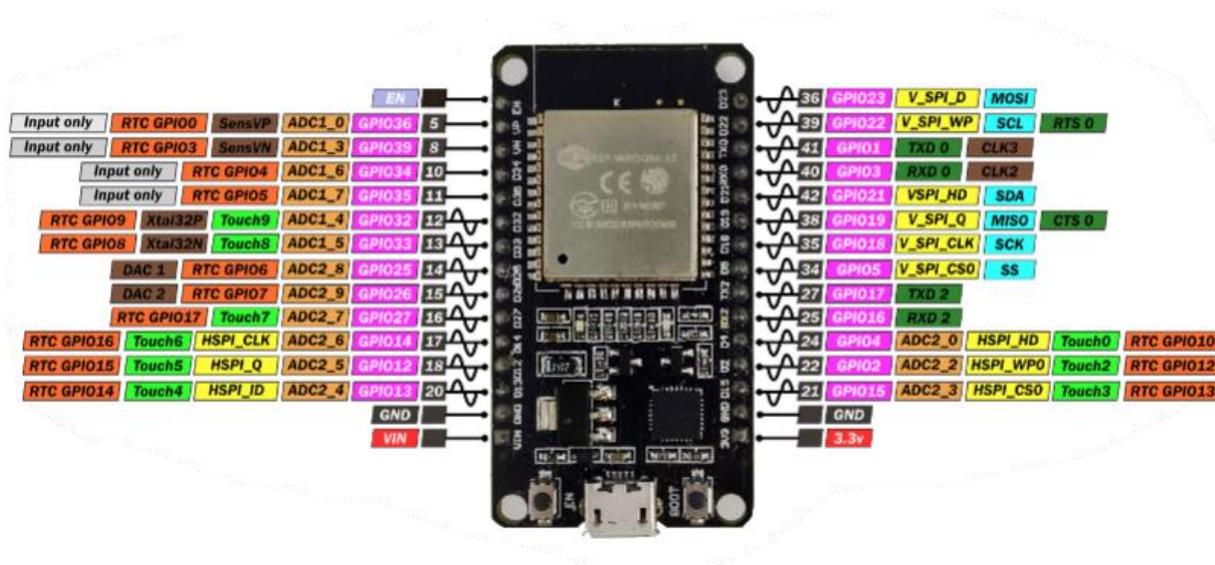
- Chip: ESP32-WROOM-32
- Voltaje de operación: 5V
- Corriente de trabajo: 80mm mA
- Con chip USB a UART
- Puerto microUSB
- Con antena on board
- Alimentación vía USB o por pines (3.3V-5V)
- Dimensiones: 28x54.4mm

- Conectividad inalámbrica:
 - Wi-Fi: 802.11 b/g/n
 - Bluetooth: v4.2 BR/EDR y BLE
- Memoria: 520 KiB SRAM

En la Figura 27 se puede observar los diferentes pines de la ESP32 WROOM y sus diferentes aplicaciones.

Figura 27

Esquema de todos los pines de ESP32



Nota. La imagen muestra los diferentes pines de la ESP32 y su uso. Tomado de Renzo Mischiati, por Mischiati, 2021. <https://www.mischiati.org/2021/02/17/doit-esp32-dev-kit-v1-high-resolution-pinout-and-specs/>

Tipos de pines

La Tabla 10 muestra la clasificación de los pines

Tabla 10

Clasificación de los pines de la ESP32

Tipo de pin	Pin	Función
Entrada/Input	GPIO 34, 35, 36, 37,38,39	Estos pines no poseen resistencias Pull-up o Pull down y solo pueden ser usados como entradas
E/S	GPIO 6 (SCK/CLK), 7 (SDO/SD0), 8 (SDI/SD1), 9 (SHD/SD2), 10 (SWP/SD3), 11 (CSC/CMD)	Los GPIO del 6 al 11 están conectados directamente al flash SPI integrado y solo se pueden usar para lo establecido
Touch Sensor	T0 (GPIO 4), T1 (GPIO 0), T2 (GPIO 2), T3 (GPIO 15), T4 (GPIO 13), T5 (GPIO 12), T6 (GPIO 14), T7 (GPIO 27), T8 (GPIO 33), T9 (GPIO 32)	Estos pines tienen la capacidad de detectar variaciones en la carga eléctrica y ser sensibles hasta por la piel humana
Convertidor analógico a digital	ADC1_CH0 (GPIO 36), ADC1_CH1 (GPIO 37), ADC1_CH2 (GPIO 38), ADC1_CH3 (GPIO 39), ADC1_CH4 (GPIO 32), ADC1_CH5 (GPIO 33), ADC1_CH6 (GPIO 34), ADC1_CH7 (GPIO 35), ADC2_CH0 (GPIO 4), ADC2_CH1 (GPIO 0), ADC2_CH2 (GPIO 2), ADC2_CH3 (GPIO 15), ADC2_CH4 (GPIO 13), ADC2_CH5 (GPIO 12), ADC2_CH6 (GPIO 14), ADC2_CH7 (GPIO 27), ADC2_CH8 (GPIO 25), ADC2_CH9 (GPIO 26)	Estos canales de entrada ADC de 18 x12 bits pueden usarse para la conversión digital.

Tipo de pin	Pin	Función
Convertidor digital a analógico	DAC1 (GPIO25), DAC2 (GPIO26)	Se dispone también de 2 canales DAC de 8 bits que sirven para convertir señales digitales a salidas de señal de voltaje analógico

Nota. La tabla muestra los diferentes pines y su uso en la ESP32. Tomado de Renzo Mischianti, por Mischianti, 2021. <https://www.mischianti.org/2021/02/17/doit-esp32-dev-kit-v1-high-resolution-pinout-and-specs/>

Factor Corriente

La Corriente consumida por todos los componentes mencionados, se muestra en la Tabla 11

Tabla 11

Corriente usada por todos los dispositivos

Tipo	Detalle
DTH11	2.5 mA
Modulo MAX6675 (sensor 1)	50 mA
Modulo MAX6675 (sensor 2)	50 mA
ESP32 WROOM	80 mA
Total	182 mA

El consumo de corriente total es 182 mA por lo que se necesita una fuente que sea capaz de suministrar más de 182 mA.

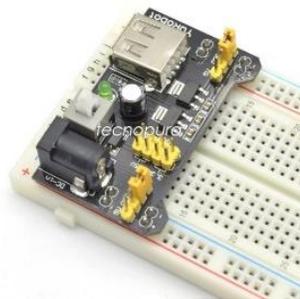
Fuente de Alimentación

Para el suministro de voltaje y corriente se puso a consideración el uso de la fuente de protoboard Marca YW robot por su facilidad de conexión y su bajo costo. La cual posee las siguientes características. (Fuente de alimentación para protoboard, s. f.)

- Voltaje de entrada: 6.5V a 12V
- Voltaje de salida 1: 3.3V o 5V (seleccionable)
- Voltaje de salida 2: 3.3V o 5V (seleccionable)
- Salida de tensión USB: 5V
- Corriente máxima de salida: 700 mA

Figura 28

Fuente de protoboard



Nota. La imagen muestra la fuente de protoboard usada. Tomado de *Tecnopura*. <https://www.tecnopura.com/producto/fuente-de-alimentacion-para-protoboard-5v-3-3v-arduino-pic/>

Esta fuente cuenta con una corriente de salida de 700 mA, lo que es suficiente para la ESP32 y sus componentes

Tiempo de Muestreo

El tiempo de muestreo es aquel número de muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal continua. Y es un parámetro muy importante para el análisis de datos, ya que, si se toma un periodo de muestreo muy grande, hay riesgo de que se pierda información. En cambio, si se toma un tiempo de muestreo muy pequeño involucrara gasto de memoria y recursos de procesamiento. (Montgomery, 2013)

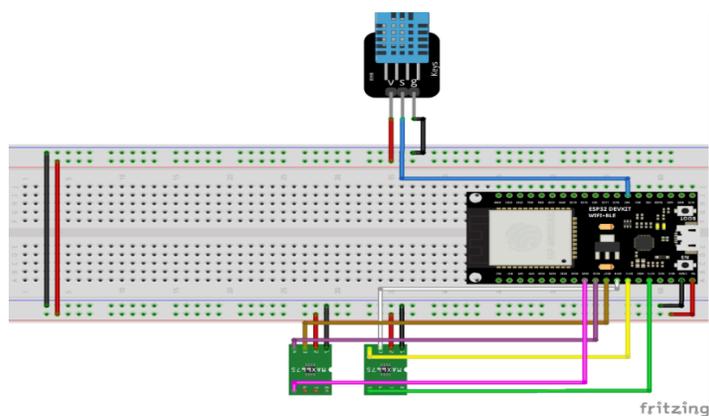
El termopar tipo k detallado anteriormente, que se utilizará como sensor de temperatura en este proceso. Tiene un tiempo de respuesta que va entre los 170 a 220 ms. Por lo tanto, el tiempo de muestreo en la tarjeta de adquisición de datos, debe ser igual o superior a los 220 ms. El análisis de este tiempo se lo verá en el siguiente apartado

Armado y Acondicionamiento

Para el armado del circuito y la unión de todos los componentes dentro de la tarjeta de adquisición de datos. Se planteo realizar el siguiente esquema realizado en fritzing Figura 29.

Figura 29

Conexión de dispositivos electrónicos en ESP32



Nota. La imagen muestra la conexión realizada en la ESP32.

El esquema muestra la conexión de los siguientes componentes:

Tabla 12

Conexión de DHT11

Tipo	Detalle
Pin VCC	Conectado a nodo de alimentación +
Pin S	Conectado a GPIO 04 PIN ADC
Pin GND	Conectado a nodo de tierra

Tabla 13

Conexión de modulo MAX6675 (Sensor 1)

Tipo	Detalle
Pin GND	Conectado a nodo de tierra
Pin VCC	Conectado a nodo de alimentación +
Pin SCK	Conectado a GPIO 14
Pin CS	Conectado a GPIO 12
Pin SO	Conectado a GPIO 13

Tabla 14

Conexión de modulo MAX6675 (Sensor 2)

Tipo	Detalle
Pin GND	Conectado a nodo de tierra
Pin VCC	Conectado a nodo de alimentación +
Pin SCK	Conectado a GPIO 27
Pin CS	Conectado a GPIO 26
Pin SO	Conectado a GPIO 25

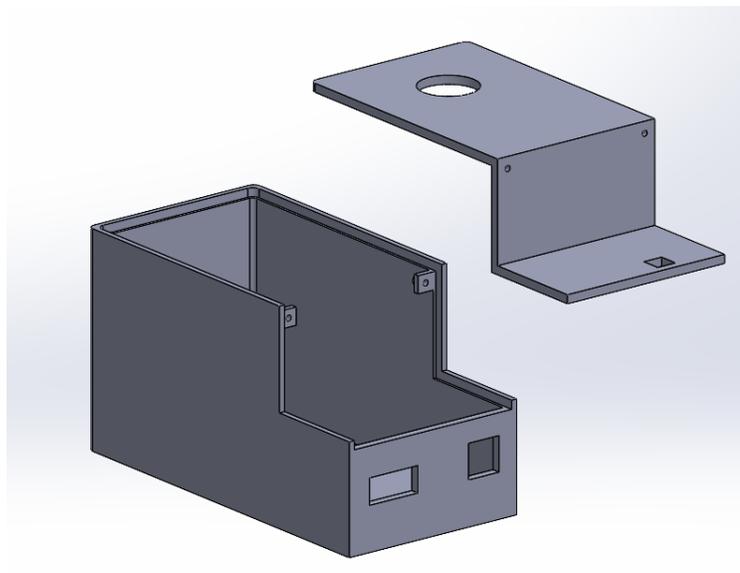
Encapsulado

Es necesario siempre proteger a los equipos electrónicos del polvo y fuentes externas. Es por esto por lo que se realizó una carcasa que incluya y proteja a todos los dispositivos.

Para ello, con la ayuda de SolidWorks. Se realizó una carcasa como se ve en la Figura 30. La estructura se imprimió en una impresora con tecnología FDM con filamento PLA proporcionado por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Figura 30

Encapsulado de los dispositivos



Nota. La imagen muestra la el encapsulado realizado en el programa de SolidWorks para protección de dispositivos electrónicos.

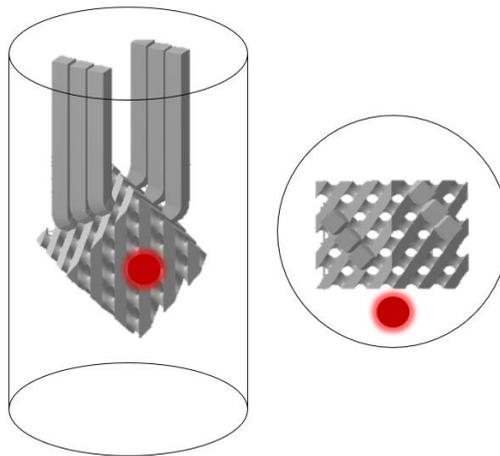
Ubicación del Termopar Tipo K

Para la ubicación del termopar, es necesario tomar en cuenta que este debe estar en una locación donde no altere el funcionamiento de la cerámica con la resina cuando este en contacto. Para ello es necesario conocer los siguientes puntos:

- Es recomendable que el sensor no se encuentre frente a una de las caras de la TPMS, como se observa en la Figura 31. Puesto que, entre la cara y el cubilete, hay un área más grande de trabajo
- Para datos más estratégicos, es necesario que el sensor se encuentre a una altura indicada preferiblemente por la mitad del cubilete ya que, en el proceso de fundición, a esa altura se encuentra la parte más crítica que es la que está en contacto con el punto central de la TPMS
- Es necesario solo un sensor ya que se espera un proceso isotrópico en todo el cubilete.

Figura 31

Ubicación propuesta para el termopar tipo K dentro del cubilete



Nota. La imagen muestra la ubicación del sensor visto en perspectiva lateral y superior.

Tiempo de Muestreo

Para seleccionar el tiempo de muestreo que se tendrá en el sistema es importante verificar los tiempos en los cuales el sensor y la tarjeta están trabajando. Este trabajo involucra 2 procesos, un proceso que es el de quemado en el horno que dura para la resina wax40 14 horas y para la resina Wax resin 17 horas. Y el otro proceso que es el involucrado en la fundición insitu de ingreso del metal, que dura aproximadamente 4 minutos. Tabla 15

Tabla 15

Duración de los procesos en materia de fundición

Proceso	Tiempo	Tiempo en segundos (s)
Quemado de resina WAX40	14h	50400
Quemado de resina WAX resin	17h	61200
Fundición	4min	240

Nota. La tabla muestra los diferentes tiempos que está activo el sensor y la tarjeta.

Como se observa, por un lado, se tiene parámetros de muestreo en un tiempo relativamente grande y por otro en un tiempo relativamente corto. Tomando en cuenta que no se quiere perder datos ni en el quemado ni en la fundición, se establece como parámetro crítico al tiempo de fundición (ya que es el menor). Según (Montgomery, 2013) una de las formas de tomar una correcta frecuencia y tamaño de muestreo, viene dada por la asignación del esfuerzo de muestreo. En donde, es imperativo tener una frecuencia de muestreo grande en un tamaño

de muestra pequeño. Es por esta razón que se asume empíricamente un mínimo de 200 datos para este proceso. Estableciendo que:

$$\frac{200 \text{ datos}}{240 \text{ s}} = 0.83 \frac{\text{datos}}{\text{s}} \rightarrow \frac{240 \text{ s}}{200 \text{ datos}} = 1.2 \frac{\text{s}}{\text{dato}}$$

Por lo tanto, el ingreso de un dato a la base datos se dará cada 1.2 s, lo que resulta optimo; puesto que el tiempo de respuesta del sensor es mucho menor a este (220 ms).

Debido a que la frecuencia de muestreo en la fundición in-situ requiere la velocidad mencionada; el proceso de quemado vendría a recolectar gran cantidad de datos. Razón por la cual se procederá a realizar un muestreo aleatorio como indica en (Montgomery & Runger, 2016). En donde se define una muestra aleatoria como; Sea X una variable aleatoria que representa el resultado de una selección de una observación de la población y sea que $f(x)$ denote la función de densidad de la probabilidad de X , en donde cada valor se toma de manera independiente, bajo las mismas condiciones (n veces). X_i denotaría la variable aleatoria que representa la repetición i . Entonces X_1, X_2, \dots, X_N constituyen una muestra aleatoria que corresponden a un valor numérico x_1, x_2, \dots, x_n con la misma distribución de probabilidad.

Para seleccionar la muestra y realizar la aleatoriedad, se procede a usar una herramienta online gratuita de cálculo de muestra de población finita. Esta herramienta se encuentra en (*Calculadora del tamaño de muestra*, s. f.):

$$Tm = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q}$$

Donde:

- Tm es el tamaño de muestra

- Z es la puntuación con referencia al nivel de confianza deseado (Tabla 16)
- e es el margen de error
- p es probabilidad de que ocurra el evento deseado
- $q=(1-p)$ es la probabilidad de que no ocurra el evento deseado

Tabla 16

Puntuación z referencial al nivel de confianza deseado

Nivel de confianza	Z
99.7	3
99	2.58
98	2.33
96	2.05
95	1.96
90	1.645
80	1.28
50	0.674

Nota. La tabla muestra el correspondiente valor que toma z en la formula dependiendo el nivel de confianza que se tenga de los datos de la población.

Capítulo V: Programación y Base de Datos

Herramientas para el Desarrollo

Las herramientas que se usaron para programar y armar todo el proceso son:

Arduino

Para la programación de todos los dispositivos electrónicos en la tarjeta de adquisición de datos ESP32. Se usó Arduino, que es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software fáciles de usar. Tiene un lenguaje propio que está basado en C/C++ y por ello soporta las funciones del lenguaje estándar C y algunas de C++. Sin embargo, es posible utilizar otros lenguajes de programación como Java, Processing, Python, Matemática, Matlab, Perl, Visual Basic, etc (Sánchez 2012)

Wifi Manager

Para la conexión a internet de la ESP32, existen varios métodos. El método más común y usado es poner las credenciales Wifi al que se requiere conectar desde el mismo código sin embargo esta configuración es muy limitada ya que si la tarjeta debe conectarse a otra red, tocaría acceder otra vez al código para cambiar las credenciales. Es por esta razón que se creó el protocolo WIFI manager para Arduino en ESP32 o ESP8266. Este protocolo explicado en (Workshop 2022) funciona de la siguiente manera:

- El ESP32 se inicia y comprueba si ya tiene la red wifi configurada.
- Si tiene las credenciales wifi-guardadas, se utilizan para acceder a la red registrada. Si la conexión tiene éxito, el programa continuo normalmente
- Si no se tiene las credenciales wifi en la red o existe una red nueva de conexión, el ESP32 se configura automáticamente como un Access point y crea una página web con la dirección local 192.168.4.1. En esta página, se encuentra el listado de todas las redes

WiFi disponibles en la Zona y a las que el usuario puede acceder a conectarse poniendo las credenciales de la red (SSID y contraseña).

- Cuando el usuario introduce la información adecuada y presiona guardar, la ESP32 regresa a su modo normal y guarda las credenciales para posteriores conexiones.

Figura 32

Interfaz de wifimanager



Nota. La imagen muestra la interfaz que se crea cuando el ESP32 crea un servidor local.

Extraída de <https://github.com/tzapu/WiFiManager>

Firestore

Firestore es una plataforma en la nube creada en 2011 para el desarrollo web y móvil de aplicaciones («Qué es Firestore: funcionalidades, ventajas y conclusiones», 2020)

Firestore Realtime database

La plataforma creada por Google, Firestore es una base de datos NoSQL basada en la nube que sincroniza los datos entre todos los clientes en tiempo real y proporciona funcionalidad offline y una increíble facilidad para leer o escribir datos. Estos datos se almacenan con formato JSON. (Moroney 2017). Esta plataforma ofrece una estructura diferente a lo que se ve en MySQL o SQL Server. Tiene una perspectiva y un enfoque diferente que

permite a los clientes tener su propia instancia y lugar de datos, ofreciendo a su vez la capacidad de conectarse con distintos tipos de aplicaciones y monitorear todos los datos entrantes con relativa facilidad.

La ventaja de usar firebase realtime database es que ofrece un plan “Spark” gratuito en donde se puede hacer uso de las operaciones de lectura y escritura ilimitadas. Lo que la hace muy eficaz para proyectos como este de monitoreo.

El plan Spark presenta los siguientes beneficios mostrados en la Tabla 17

Tabla 17

Plan Spark de Firebase

Tipo	Detalle
Base de datos en tiempo real	Spark
Conexiones simultáneas	100
GB almacenados	1 GB
GB descargados	10 GB/mes
Bases de datos por proyecto	1

Nota. La tabla muestra los beneficios del sistema gratuito spark en Firebase data base real time. Extraído de *¿Firebase cuesta dinero?*, 2021. <https://blog.back4app.com/es/firebase-cuesta-dinero/>

Hojas de Cálculo de Google

Las hojas de cálculo de Google son una herramienta web que permite manipular datos numéricos y de texto en una tabla formadas por filas y columnas que permite organizar datos y realizar cálculos aritméticos básicos o aplicar funciones matemáticas de mayor complejidad y

utilizar funciones de estadísticas o funciones de tipo lógica para realizar gráficos y algoritmos. (ExcelParaTodos, s. f.)

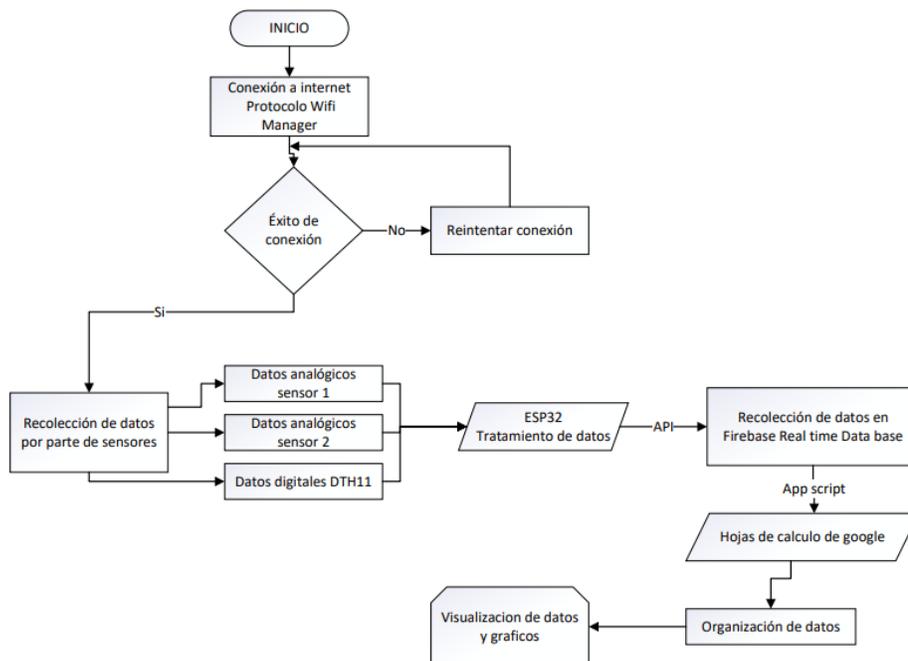
Una de las herramientas que proporciona las hojas de cálculo de Google es el App Script que es una plataforma que permite desarrollar scripts en el entorno virtual de Google para realizar miniaplicaciones con lenguaje de JavaScript y conectarse a fuentes de datos tanto del ecosistema de Google como de externos y tienen el fin de automatizar tareas internas y procesar información. Ideal para procesos que requieren automatización y análisis de datos. (¿Qué es Google Apps Script y para qué sirve?, s. f.)

Programación

La propuesta para el esquema de secuencias se detalla en el diagrama de flujo de la Figura 33.

Figura 33

Diagrama de flujo de la programación en la ESP32



Nota. La imagen muestra el diagrama de flujo de programación que se seguirá desde el encendido de la tarjeta hasta la llegada del dato a la base de datos.

Inicialización de la Base de Datos

Lo primero que se realizó fue crear la base de datos en Firebase para poder conectar la misma con la esp32 en la plataforma Arduino. Para ver la creación de la base de datos mencionada, revisar el Anexo

Comunicación ESP32 - Firebase

Como segundo paso se procedió a realizar la programación de la ESP32 en Arduino. Es importante recordar seleccionar la tarjeta e instalar las librerías necesarias de: El sensor dht11, Max6675 (módulo de termopar tipo k), Wifi manager, FirebaseESP32 y addons.

Figura 34

Declaración de librerías

```
#include <WiFiManager.h>
#include <DHT.h>
#include <FirebaseESP32.h>
#include <max6675.h>
#define DHTPIN 4
#define DHTTYPE DHT11
#include <addons/TokenHelper.h>
#include <addons/RTDBHelper.h>
```

El código implementado posee las siguientes etapas:

Etapas de declaración de variables y pines de la tarjeta.

Como se ve en la Figura 35, se declara:

- El objeto DHT con los parámetros pin y tipo de DHT que fueron declarados anteriormente
- Se inicializa las constantes con los pines en donde están conectadas las entradas de datos del módulo MAX6675. Como se vio en la sección de armado, los dos sensores

van conectados a los pines especificados. Y se crea el objeto MAX6675 termopar y MAX6675 termopar1 para los parámetros de librería del módulo.

- Después se inicializan variables para fines del programa que ya se verán.
- Por último, lo que está en el recuadro en azul corresponde a las credenciales y url de Firebase por donde la ESP32 se conectará y establecerá conexión. Los parámetros definidos:
 - FirebaseData fbdo: corresponde al parámetro de permiso Firebase para establecer los datos
 - FirebaseAuth auth: corresponde al parámetro de permiso Firebase para establecer la autenticación
 - FirebaseConfig config: corresponde al parámetro de permiso Firebase para establecer la edición y configuración de datos

Figura 35

Código de la declaración de variables

```
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

int csk=14;
int cs=12;
int so=13;
MAX6675 termopar(csk,cs,so);

int csk1=27;
int cs1=26;
int sol=25;
MAX6675 termopar1(csk1,cs1,sol);

int x=0;
String st;
```

```
#define API_KEY "pTsI472X4PpEUkS9ymjEpmCeAn3lBhTDC1BKeKHk"
#define DATABASE_URL "https://esp32-215bl-default-rtadb.firebaseio.com/"

FirebaseData fbdo;
FirebaseAuth auth;
FirebaseConfig config;
```

Nota. La figura muestra un fragmento del código completo.

Etapas de void Setup Arduino

Esta etapa corresponde a la función principal y el punto de entrada del programa. Como se observa en las siguientes líneas de código de la Figura 36. Se empieza:

- Con el serial Begin que establece la comunicación del Arduino con la computadora a una determinada velocidad de comunicación serial. En este caso 115200 bits por segundo
- Iniciando el sensor dht con el comando Begin. Que establece comunicación con el pin digital.
- En la sección correspondiente al recuadro en Azul, se describe la función de la librería Wifi manager. En donde:
 - Se crea una instancia a la clase WifiManager como wm que se encargará de toda la gestión del sistema.
 - Con la función posterior de autoConnect, se crea el Access Point explicado en la sección anterior y la interfaz para selección de red
 - La función If permite dar un mensaje al usuario si tuvo o no tuvo éxito en la conexión
- Las siguientes líneas posteriores al recuadro azul corresponden a la inicialización de las credenciales para Firebase
 - La función Firebase deleteNodo sirve para borrar toda la base de datos a penas se inicie la ESP32. Esto con el fin de tener limpio el ambiente de trabajo en la plataforma de Firebase. (Los datos anteriores medidos, no se borrarán ya que estarán guardados en la instancia de hojas de cálculo de Google, como se verá posteriormente)

Figura 36

Código para la función Void Setup

```

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  dht.begin();
  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFiManager wm;
  bool res;
  res = wm.autoConnect("AutoConnectAP");
  if(!res) {
    Serial.println("Failed to connect");
  }
  else {
    Serial.println("connected...");
  }
  Serial.print("Connected with IP: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
  Serial.println();
  Serial.printf("Firebase Client v%s\n\n", FIREBASE_CLIENT_VERSION);
  config.api_key = API_KEY;
  config.database_url = DATABASE_URL;

  Firebase.begin(DATABASE_URL, API_KEY);
  Firebase.setDoubleDigits(5);
  Firebase.deleteNode(fbdo, "test");
}

```

Nota. La figura muestra un fragmento del código completo.

Etapa de void Loop Arduino

Esta es la función de bucle de Arduino mostrada en la Figura 37 y es aquella que repetirá los comandos mientras la placa ESP32 está habilitada. En esta fase se encuentra:

- La transformación de los datos entrantes de temperatura y humedad del sensor dht11 con el objeto DHT que se inicializo anteriormente

- Las líneas correspondientes al recuadro azul señalan la transformación para lectura de los datos entrantes de temperatura asociados al objeto termopar que se inicializo anteriormente
- Las líneas correspondientes al recuadro verde señalan la organización en la que los datos de la temperatura del termopar entrarán a la base de datos de Firebase. En donde por ejemplo la línea “fbdo, “test/a/”+st,temperatura1” es la ruta que seguirá la base datos. Creando así un proyecto llamado test, una carpeta llamada “a”, el numero asociado a la entrada del dato y la temperatura
- La configuración de la variable x está diseñada para que pueda registrar el número de dato entrante
- El setfloat de firebase es el tipo de entrada de dato. Este puede ser booleano, int, JSon, array, etc.). Y es un tipo de dato Set que significa que el nuevo dato reemplazara al anterior.

Figura 37

Código para la función Void loop

```
void loop()  
{  
    float h = dht.readHumidity();  
    float t = dht.readTemperature();  
  
    float temperatur1;  
    temperatur1=termopar.readCelsius();  
  
    float temperatura2;  
    temperatura2=termopar1.readCelsius();  
  
    st=String(x);
```

```

if (Firebase.ready())
{
  Firebase.setFloat(fbdo, "/test/a/"+st, temperatur1);
  Firebase.setFloat(fbdo, "/test/b/"+st, temperatura2);
  Firebase.setFloat(fbdo, "/test/c/"+st, temperatura3);
  Firebase.setFloat(fbdo, "/test/sensor1 ", temperatur1);
  Firebase.setFloat(fbdo, "/test/sensor2", temperatura2);
  Firebase.setFloat(fbdo, "/test/sensor3", temperatura3);
  Firebase.setFloat(fbdo, "/test/Fambientales/l/temperatura", t);
  Firebase.setFloat(fbdo, "/test/Fambientales/l/humedad", h);

  x=st.toInt();
  x=x+1;

  delay(1000);
}

```

Nota. La figura muestra un fragmento del código completo.

Comunicación Firebase - Hojas de Cálculo de Google

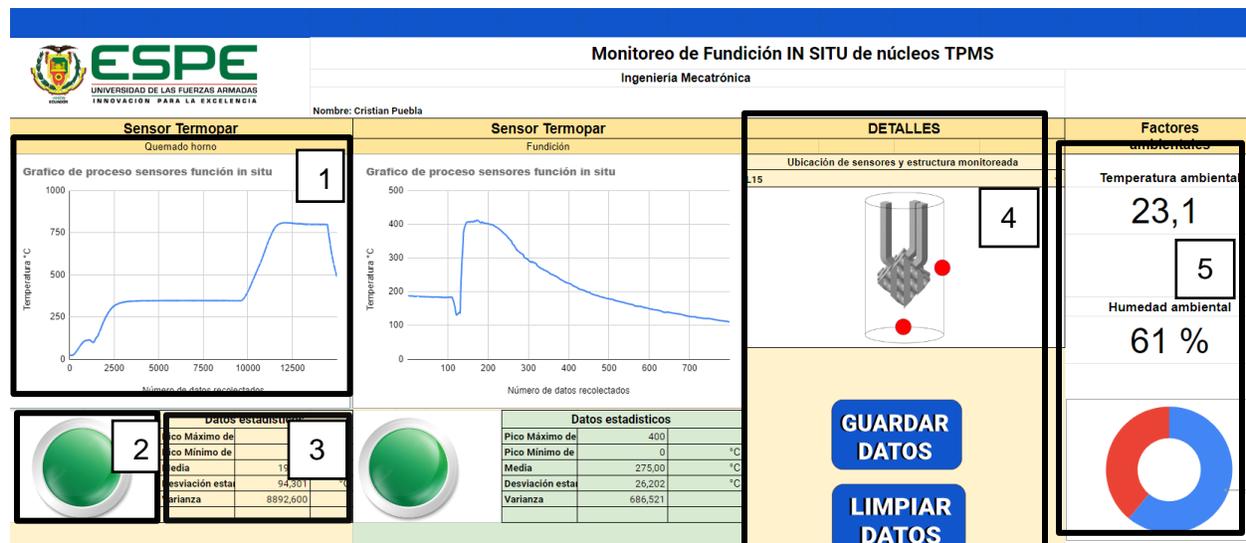
Como tercer paso se realiza la comunicación entre Firebase y las hojas de cálculo de Google (Los pasos para la creación de esta, se encuentran en el Anexo).

Dashboard

Para la creación de la HMI (Interfaz Humano-máquina) se busca que la información recolectada se presente de forma accesible para la cognición de las personas basándose en su ergonomía y aspectos contractuales implicados en la interacción de los operarios y las máquinas (Filali, 2014). Para lograr este objetivo, la interfaz se basó en (REDACCIÓN, 2020) y en las normas gedis que consta de 10 indicadores que cubren todos los parámetros de diseño como: distribución, estructura, navegación, color, texto, estado de los dispositivos, valores de proceso, gráficos y tablas, alarmas y entrada de datos. Fundamentando la estructura en la evitación de la aglomeración de objetos. La interfaz es la siguiente, Figura 38.

Figura 38

Dashboard realizado para la visualización de datos



Nota. La imagen muestra la interfaz de usuario que se verá mientras se toma los datos.

Los recuadros mostrados en la Figura 38. muestran

- Recuadro 1: Muestra las gráficas que detallan el movimiento de los datos a través del tiempo. En este caso de ejemplo, la primera grafica del sensor termopar/quemado horno; muestra el tratamiento térmico del cubilete durante las 14 horas de quemado. Y la gráfica del sensor muestra la fundición desde que el cubilete sale del horno, ingresa el aluminio y su fase enfriamiento.
- Recuadro 2: Muestra las alarmas del sistema en el caso de que el sensor detecte una temperatura anormal en el horno o en la fundición. Siguiendo las normas gedis, rojo como alerta peligro de fase y verde como alerta de normalidad
- Recuadro 3: Muestra datos estadísticos, sobre los datos registrados del proceso in situ

- Recuadro 4 Información sobre la estructura que está fundiendo y botones para guardar y limpiar datos de la base. Estos botones fueron creados con la ayuda de los macros de las hojas de cálculo de Google sheets.
- Recuadro 5: Muestra los datos generales y que necesitan verse puntuales, en este caso los datos registrados por el sensor dht11 con temperatura y humedad

Capítulo VI: Funcionamiento y Desarrollo

Este capítulo, demuestra el proceso de fundición y el funcionamiento de los sensores en el monitoreo in situ. Desde su conexión hasta la fundición, siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 39 y 40.

Figura 39

Diagrama general de flujo de todo el proceso de fundición (1)

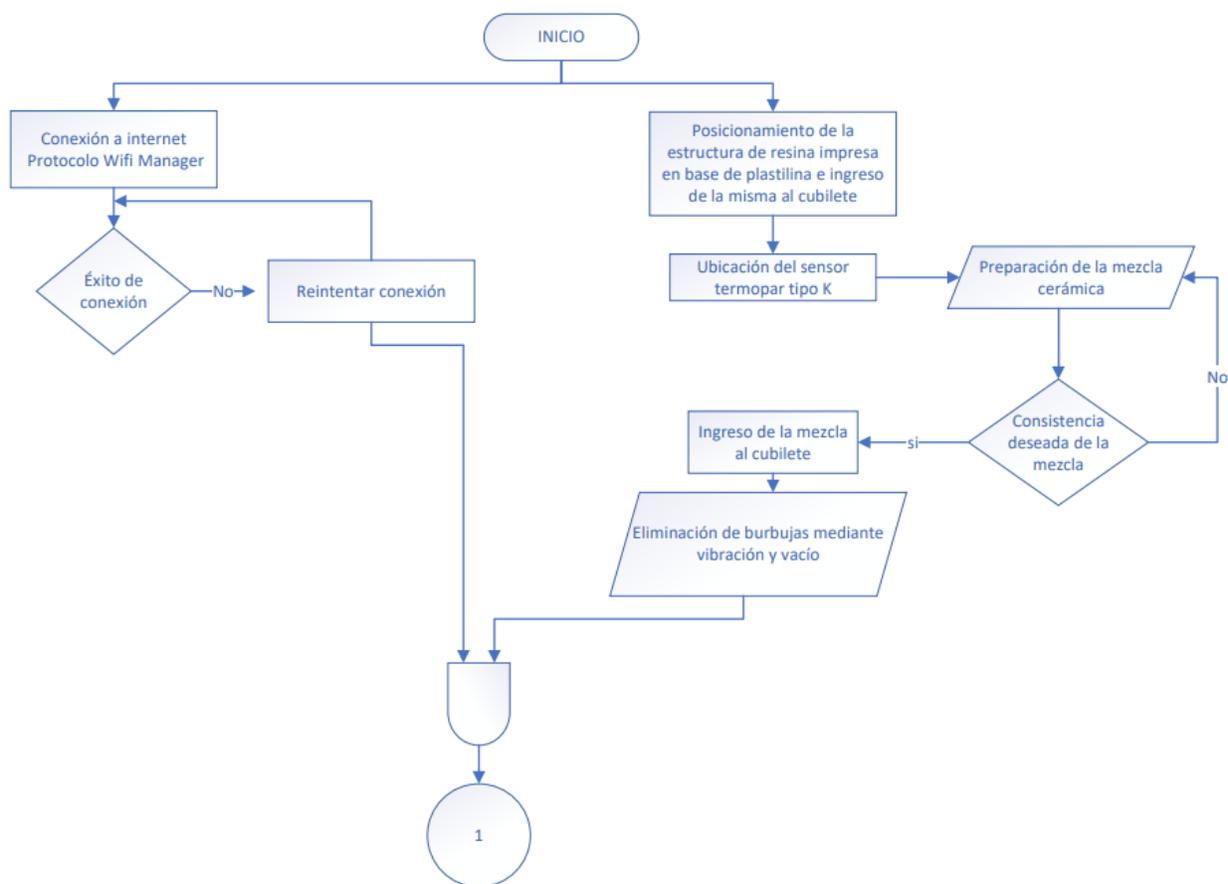
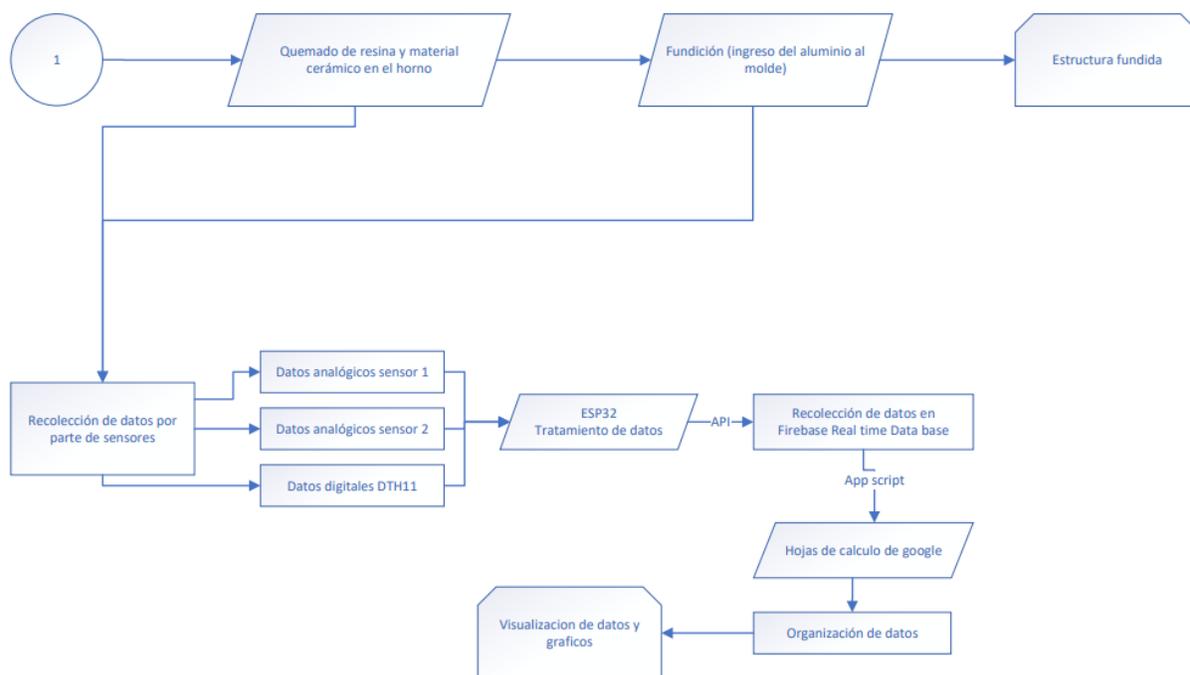


Figura 40

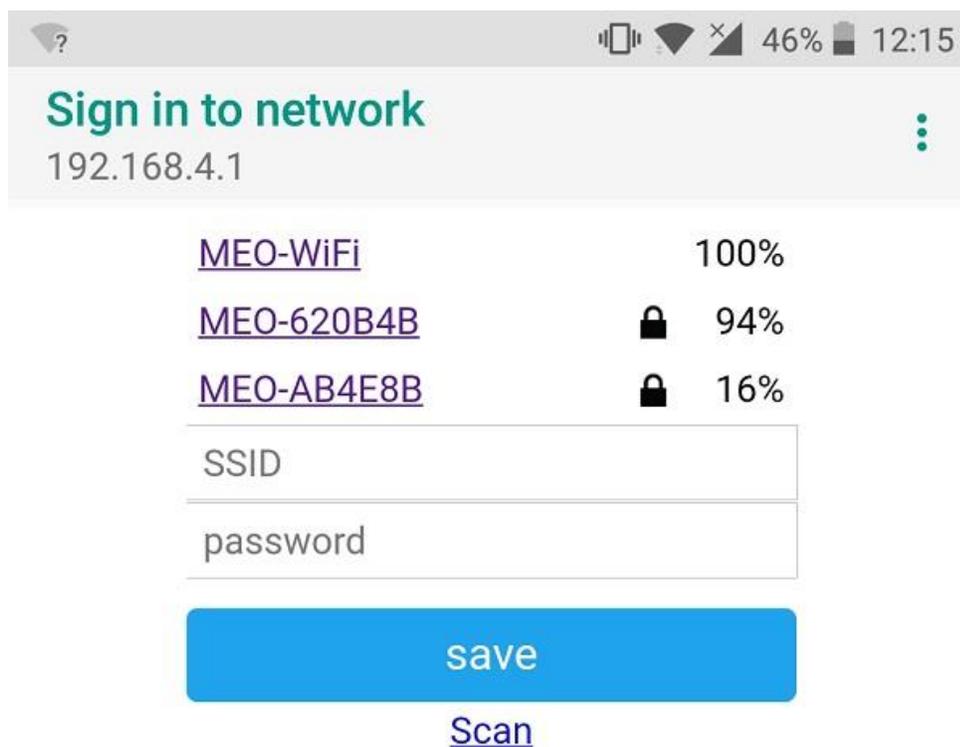
Diagrama general de flujo de todo el proceso de fundición (2)



Si siguiendo el diagrama de flujo el primer paso a realizar es la conexión de la tarjeta de adquisición de datos a la red Wifi que se va a utilizar. Para ello, al conectar el ESP32, este automáticamente creará un servidor web tal como se mencionó en el capítulo V. Por lo que: conectándose a ese servidor web desde el celular o la computadora e ingresando a la página web alojada en la dirección 192.168.4.1. Se deberá ingresar los parámetros de la red wifi a la que se quiere que la ESP32 se conecte. Tal como se muestra en la Figura 41 de ejemplo

Figura 41

Servidor web Wifi-manager



Nota. La imagen muestra el servidor web wifi manager que se despliega al conectarse a la dirección 192.168.4.1 desde el celular.

Cuando la ESP32 ya está correctamente conectada se procede a seguir con el armado del cubilete y la estructura, siguiendo la metodología de joyería para realizar la fundición de las TPMS. Para lo cual se describirá a continuación todo lo que se considera y los detalles de cada fase basándose en la fundición por cera perdida para joyería:

1. Realizar el modelo en cera que sea consumible

El método que se usó para realizar la estructura TPMS en 3D, es la estereolitografía con la impresora form3 de formlabs. Algunas de las estructuras impresas, se muestran en la Figura 42

Figura 42

Estructuras TPMS impresas en la resina WAX40



Nota. La imagen muestra varias de las estructuras a fundir con los distintos parámetros del DOE.

Con los modelos ya impresos, se procede a realizar la base para el molde. Para ello se diseñó una base de plastilina junto con cera derretida para sostener la estructura, Figura 43. En esta misma instancia se coloca el termopar tipo K

Posteriormente se ingresa todo al cubilete y se refuerza con cinta aislante para que el agua no se desborde por ningún orificio

Figura 43

Estructura dentro del cubilete



Nota. La imagen muestra cómo se adjunta la estructura TPMS en el cubilete y su inserción con cera y plastilina. El termopar está colocado tal como se indicó anteriormente.

En este paso, tal como se mencionó en el capítulo II se procede a ingresar el material cerámico dentro del cubilete. Para ello primero se introduce agua hasta recubrir un 80% de la pieza y luego se la extrae para mezclar con el CERTUS. En donde el agua deberá ser un 40 % de todo el polvo cerámico

Figura 44

Preparación del material cerámico y vertimiento en cubilete



Nota. La primera imagen muestra cómo se pesa el material cerámico para equipararlo con el agua y la segunda imagen muestra el vertimiento de este sobre la tpm en el cubilete.

Desde el momento que comenzó la mezcla hay que recordar que de acuerdo con el fabricante se tienen 8 minutos para dejar listo todo antes de ingresar al horno.

Cuando se ingresa el yeso dentro de la estructura, el cubilete se somete a una pequeña vibración durante unos minutos para eliminar las burbujas grandes dentro del molde y posteriormente se ingresa a la cámara de vacío (Figura 45) para que las burbujas pequeñas también se eliminen.

En esta etapa se conecta el sensor a la ESP32 y se verifica que los datos estén ingresando correctamente. Para ello se ingresa a la página de Firebase donde está montada la base de datos y se observa como los datos nuevos están ingresando. (Los datos nuevos ingresados se remarcan con un brillo naranja como se observa en la Figura 46)

Toda esta base de datos que se está registrando in situ, se traslada automáticamente al Dashboard de hojas de Google cada 1 minuto

Figura 45

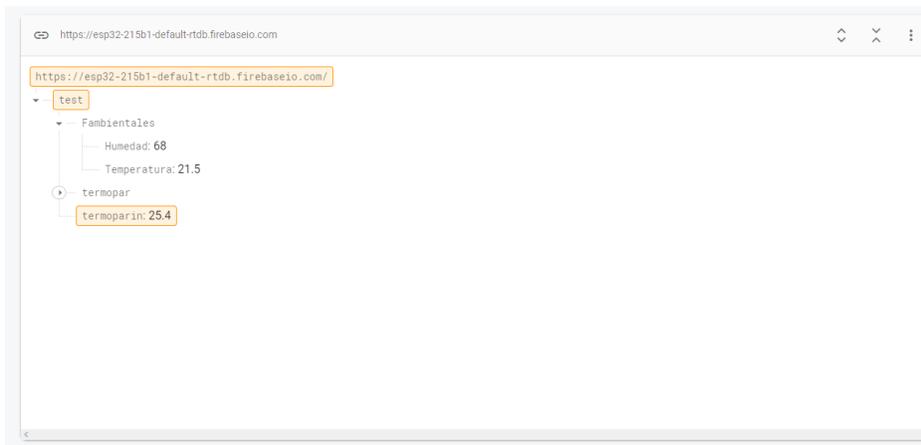
Cubilete sometido al vacío



Nota. La imagen muestra al cubilete dentro de la cámara de vacío para eliminar todas las burbujas internas.

Figura 46

Cubilete sometido al vacío



Nota. La imagen muestra el ingreso de los nuevos datos a la base de datos de Firebase.

2. Quemar el modelo para que deje un molde negativo dentro del material refractario

En esta etapa se tomó en cuenta no el tratamiento térmico que debe recibir el yeso (Certus), sino el del tipo de resina. Siguiendo las rampas necesarias en el horno de fundición a excepción de la última temperatura de mantenimiento en donde se fijó de 732 y 750 a 790 °C

3. Fundición llenando el molde con el metal

Cuando el tratamiento térmico del cubilete termina, se procede a bajar la temperatura hasta una de las especificadas en el diseño experimental. Se retira el cubilete del horno y el aluminio que previamente ya debe estar fundido, se ingresa por la parte superior en donde se encuentran los vertederos de alimentación del molde. Y en la parte inferior se encuentra igual un sistema de vacío que ayudará al aluminio a recorrer toda la estructura del molde en cuestión. Figura 47.

Figura 47

Ingreso del aluminio al molde



Nota. La imagen muestra el ingreso del aluminio al molde. Se puede observar como en la parte inferior de la sección tomate se encuentra el conducto del vacío haciendo presión de ingreso.

4. Obtención del modelo metálico destruyendo el molde

Cuando la fundición termina, se deja reposar el cubilete por un momento hasta una temperatura aproximada de 60 °C y se lo introduce en un recipiente del agua para desmenuzar el yeso y sacar la pieza fundida del cubilete.

Figura 48

TPMS obtenida



Nota. La imagen muestra la TPMS después de limpiarse bien.

Capítulo VII: Análisis y Discusión de Resultados

Resultados del Diseño Experimental

Para evaluar el resultado del diseño experimental para los 3 factores de: Temperatura del molde, Sistema de alimentación y longitud de celda unitaria. (Veintimilla, 2023), tomó 2 características que son: calidad superficial y peso real vs peso teórico

Calidad Superficial

Para la calidad superficial (Veintimilla, 2023) evaluó de forma empírica los TPMS, otorgando una calificación de 1 a 5, si cumplen las siguientes características (Donde 1 representa una calidad superficial muy baja y 5 representa una calidad superficial muy buena):

- 1 – Presenta superficies incompletas
- 2 – Superficie con mucha porosidad superficial y la presente porosidades profundas
- 3 – Superficie con mucha porosidad superficial
- 4 – Superficie con una cantidad moderada de porosidad superficial
- 5 – Presenta poco o ningún defecto de porosidad superficial

El resultado de este análisis resumido se encuentra en la Tabla 18 de respuesta para medias y en la Tabla 19 de respuesta para relaciones de señal ruido. Con su respectiva grafica Figura 49 y Figura 50

Tabla 18

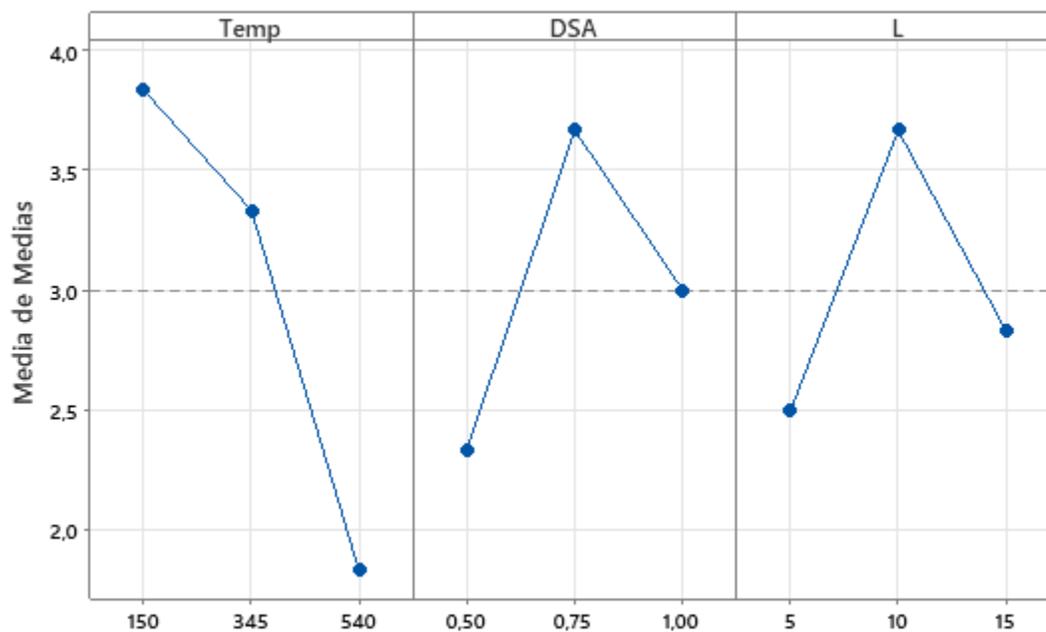
Tabla de respuesta para medias

Nivel	Temp	DSA	L
1	3,833	2,333	2,500
2	3,333	3,667	3,667
3	1,833	3,000	2,833
Delta	2,000	1,333	1,167
Clasificar	1	2	3

Nota. Extraído de *Fundición de estructuras TPMS por cera perdida* Por Veintimilla Fabricio, 2023. ESPE.

Figura 49

Grafica de efectos principales para la calidad superficial



Nota. Extraído de *Fundición de estructuras TPMS por cera perdida* Por Veintimilla Fabricio, 2023. ESPE.

Tabla 19

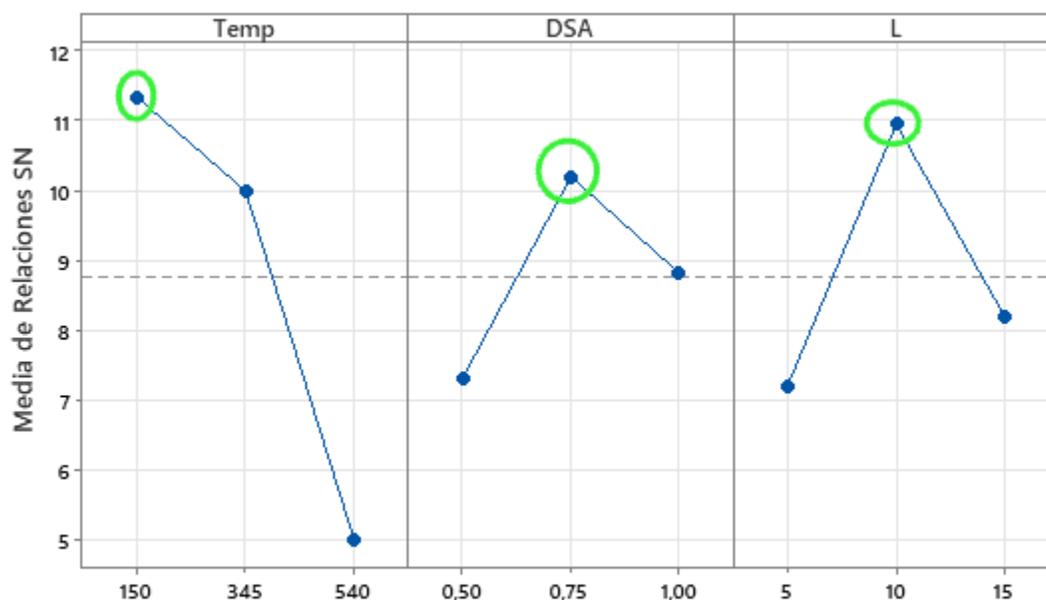
Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido. Más grande es mejor

Nivel	Temp	DSA	L
1	11,326	7,313	7,195
2	9,989	10,188	10,940
3	5,001	8,815	8,182
Delta	6,326	2,876	3,745
Clasificar	1	3	2

Nota. Extraído de *Fundición de estructuras TPMS por cera perdida* Por Veintimilla Fabricio, 2023. ESPE.

Figura 50

Grafica de efectos principales para Relaciones SN de la calidad superficial



Señal a ruido: Más grande es mejor

Nota. Extraído de *Fundición de estructuras TPMS por cera perdida* Por Veintimilla Fabricio, 2023. ESPE.

De acuerdo con las tablas y las figuras observados, se puede decir que el factor más influyente del proceso es la temperatura del molde a la que se hace la fundición. Y que la mejor configuración para obtener una TPMS de mayor calidad superficial es con los factores:

- Temperatura del molde: 150 °C
- Sistema de alimentación: 75% de bebederos calculados
- Longitud de celda unitaria: L10

Peso de los Intercambiadores

Para determinar esta característica (Veintimilla, 2023), mide el nivel de contracción y de llenado que tiene la pieza y lo compara con la versión teórica. Sacando el error porcentual que tiene cada una, con la siguiente formula

$$Error = \frac{Peso\ teorico - Peso\ real}{Peso\ teorico} * 100\%$$

El resultado de este análisis resumido se encuentra en la Tabla 20 de respuesta para medias y en la Extraído de *Fundición de estructuras TPMS por cera perdida* Por Veintimilla Fabricio, 2023. ESPE.

Tabla 21 de respuesta para relaciones de señal ruido. Con su respectiva grafica Extraído de *Fundición de estructuras TPMS por cera perdida* Por Veintimilla Fabricio, 2023. ESPE.

Figura 51 y **Figura 52**

Tabla 20

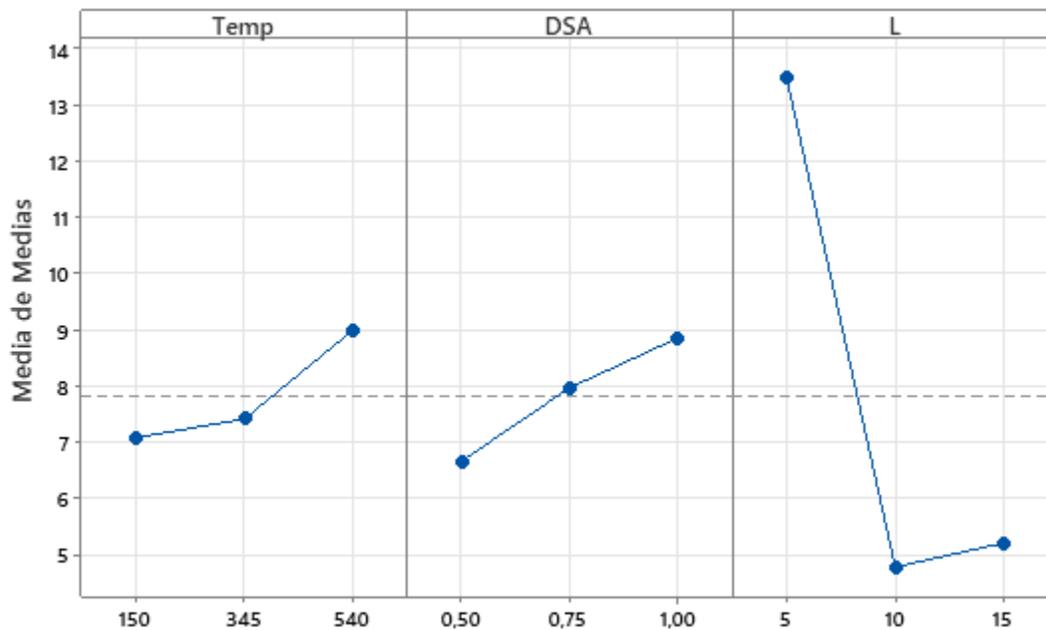
Tabla de respuesta para medias

Nivel	Temp	DSA	L
1	7,079	6,665	13,498
2	7,415	7,970	4,782
3	8,997	8,855	5,210
Delta	1,919	2,190	8,716
Clasificar	3	2	1

Nota. Extraído de *Fundición de estructuras TPMS por cera perdida* Por Veintimilla Fabricio, 2023. ESPE.

Figura 51

Grafica de efectos principales para la calidad superficial



Nota. Extraído de *Fundición de estructuras TPMS por cera perdida* Por Veintimilla Fabricio, 2023. ESPE.

Tabla 21

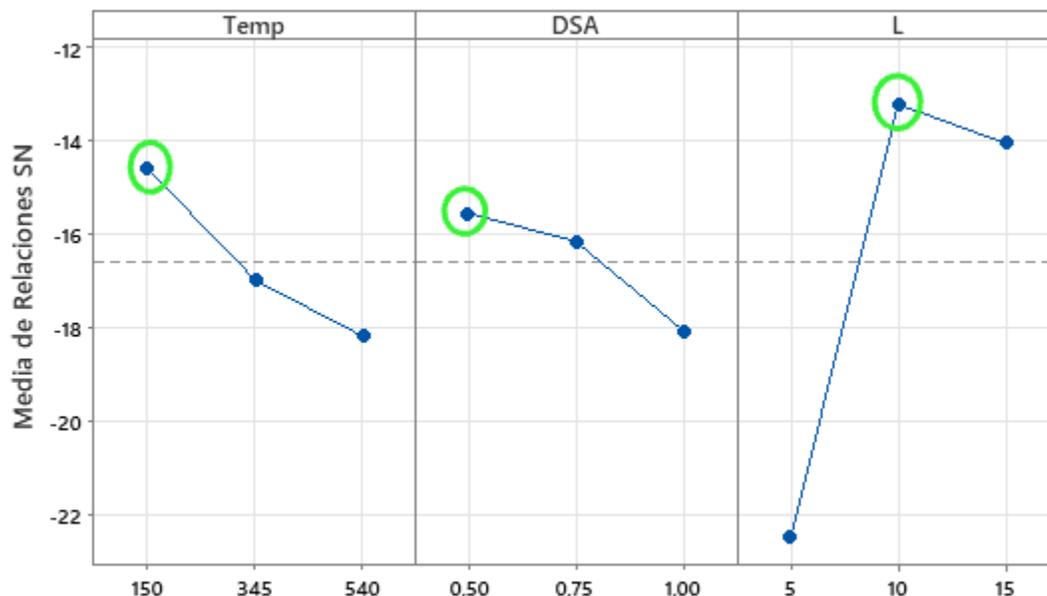
Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido. Más grande es mejor

Nivel	Temp	DSA	L
1	-14,61	-15,57	-22,51
2	-17,00	-16,17	-13,24
3	-18,20	-18,08	-14,07
Delta	3,59	2,51	9,27
Clasificar	2	3	1

Nota. Extraído de *Fundición de estructuras TPMS por cera perdida* Por Veintimilla Fabricio, 2023. ESPE.

Figura 52

Grafica de efectos principales para Relaciones SN de la calidad superficial



Nota. Extraído de *Fundición de estructuras TPMS por cera perdida* Por Veintimilla Fabricio, 2023. ESPE.

De acuerdo con las tablas y las figuras observados, se puede decir que el factor más influyente del proceso es la temperatura del molde a la que se hace la fundición. Y que la mejor configuración para obtener una TPMS con un peso más acercado al teórico es:

- Temperatura del molde: 150 °C
- Sistema de alimentación: 50% de bebederos calculados
- Longitud de celda unitaria: L10

Monitoreo de Quemado

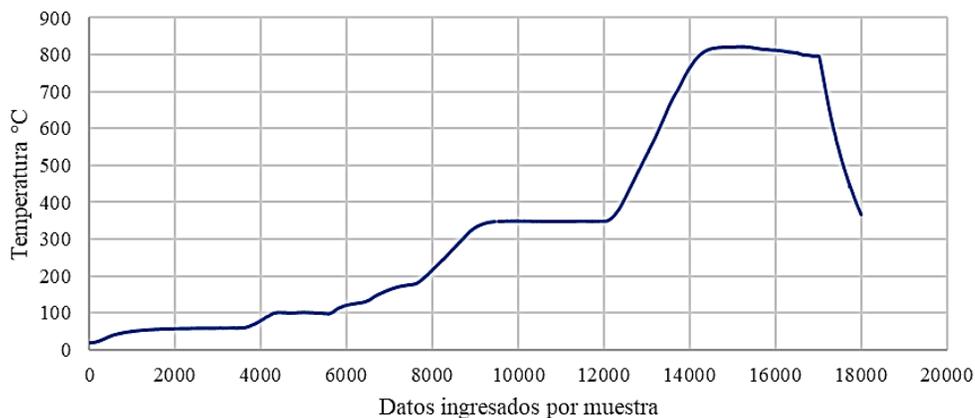
Como se mencionó en el capítulo III, se usó 2 tipos de resina para la fase de quemado en donde se realizaba el tratamiento térmico de las mismas.

WAX40

Para la resina WAX40, se registró los siguientes datos implantados en la Figura 53. La cual corresponde a la Figura teórica de la Tabla 3

Figura 53

Quemado de resina WAX 40 L10-9 alimentadores.

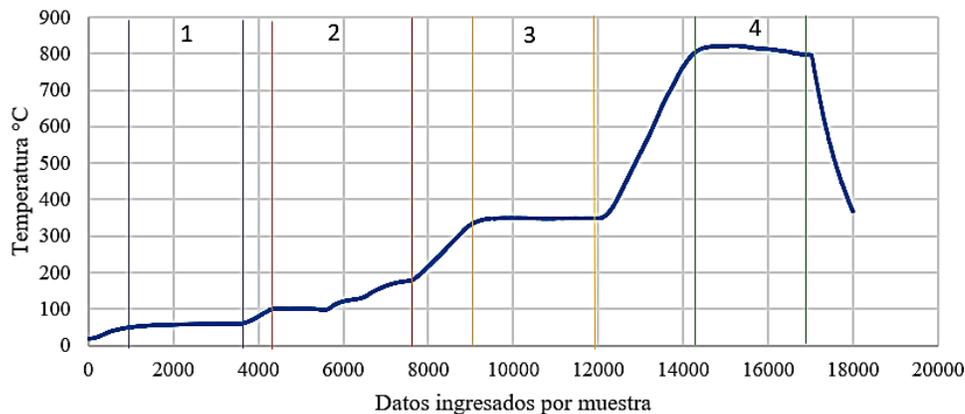


Nota. La imagen representa la curva de temperaturas registrada durante el quemado del cubilete con la resina WAX 40 L10 con 9 alimentadores.

Para el análisis de esta gráfica y los datos, se procedió a realizar una división de segmentos para evaluar las etapas en donde la temperatura del horno alcanzaba un estado teórico de mantenimiento. Como se observa en la Figura 39, se dividió en 4 etapas en donde de acuerdo con la Tabla 3 el mantenimiento de la temperatura se registra en 55, 150, 300 y 790 °C

Figura 54

División en zonas (Resina WAX 40 L10-9).



Nota. La imagen muestra las zonas de estudio que se realizó para la carta de control de la resina WAX 40 L10-9.

Fase 1: 55°C

Para la evaluación del tramo 1 se hizo una carta de control X-R, estableciendo los límites puestos en la Figura 54, con datos pertenecientes a 2 monitoreos realizados con la misma resina.

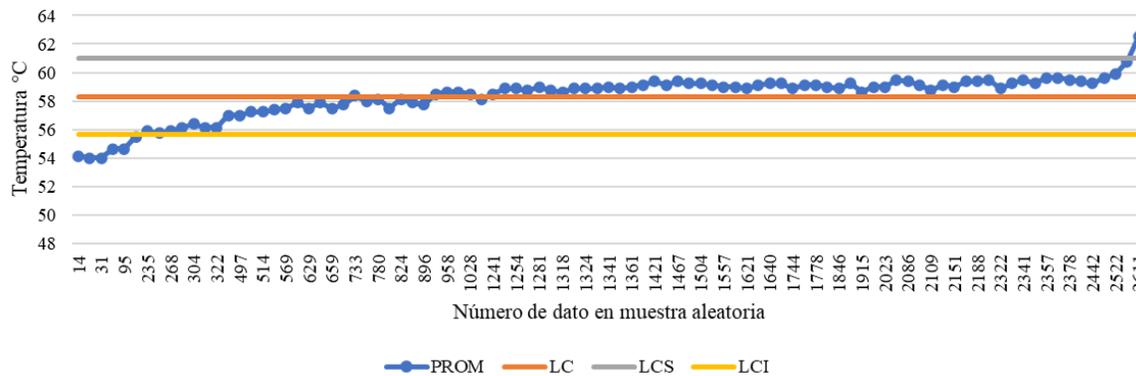
Se calcula una muestra de los 2647 datos que se encuentran en esta fase, a un nivel de confianza de 95% (puntuación $z=1.96$), con una margen de error de 10% (tolerancia de error superior e inferior de 5%) y un p de 0.5.

$$Tm = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q} = \frac{2647 * 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}{0.1^2 * (2647 - 1) + 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)} \approx 93$$

Tomando la muestra de 93 datos en los 2 subgrupos. Se tiene las grafica de control de medias Figura 41 y la gráfica de control de rangos en la Figura.

Figura 55

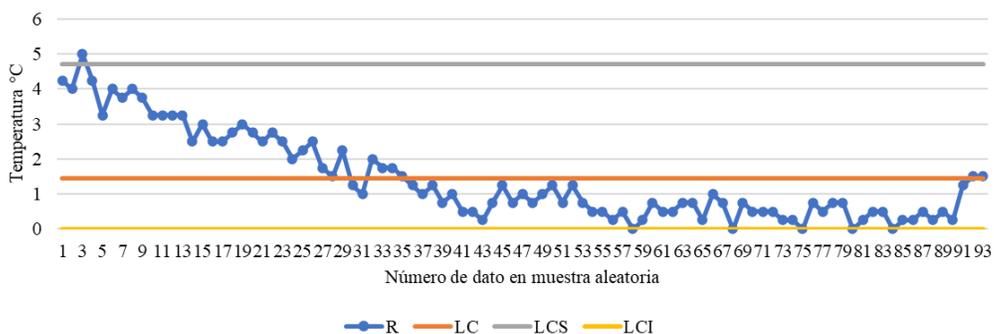
Zona 1 grafica de control de medias.



Nota. Se muestra la gráfica de control de medias de la zona de estudio 1 que se realizó en la resina WAX40. LC=58.32, LCS=61.03, LCI=55.62 .

Figura 56

Zona 1 grafica de control de rangos.



Nota. Se muestra la gráfica de rangos de la zona de estudio 1 que se realizó en la resina WAX40.

En la Figura 55 se observa que el promedio de medias entre los 2 monitoreos usados se encuentra en los 58.32 °C. Con 3.32 °C por encima del valor nominal al cual debe estar en esta Fase. Por lo demás a excepción de los primeros datos que se encuentran por debajo de la LCI y los últimos que se encuentran por encima de la LCS, el sistema en los monitores se estabiliza sin ninguna variación grande.

Los primeros y los últimos datos muestran ese posible desalineamiento debido al estado transitorio que presenta el horno antes de estabilizarse.

En la Figura 56 se observa que el sistema presenta una gran variación en los datos de los dos subgrupos, especialmente en el inicio y el final.

Fase 2: 150°C

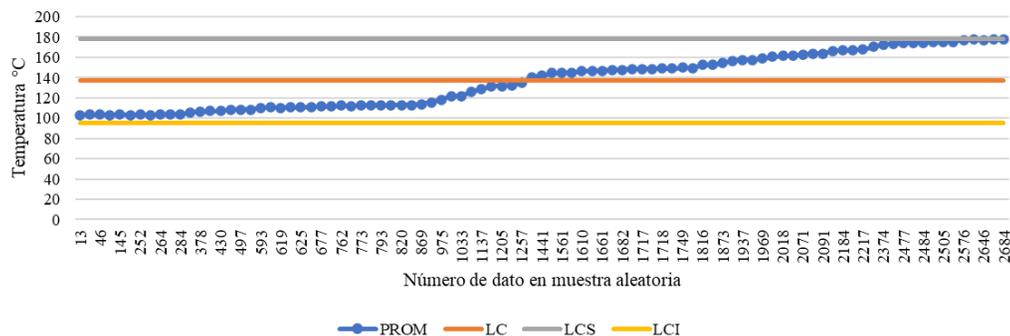
Se calcula una muestra de los 2716 datos que se encuentran en esta fase, a un nivel de confianza de 95% (puntuación $z=1.96$), con una margen de error de 10% y un p de 0.5.

$$Tm = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q} = \frac{2716 * 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}{0.1^2 * (2716 - 1) + 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)} \approx 95$$

Tomando la muestra de 95 datos en los 2 subgrupos. Se tiene las grafica de control de medias Figura 57 y la gráfica de control de rangos en la Figura 58.

Figura 57

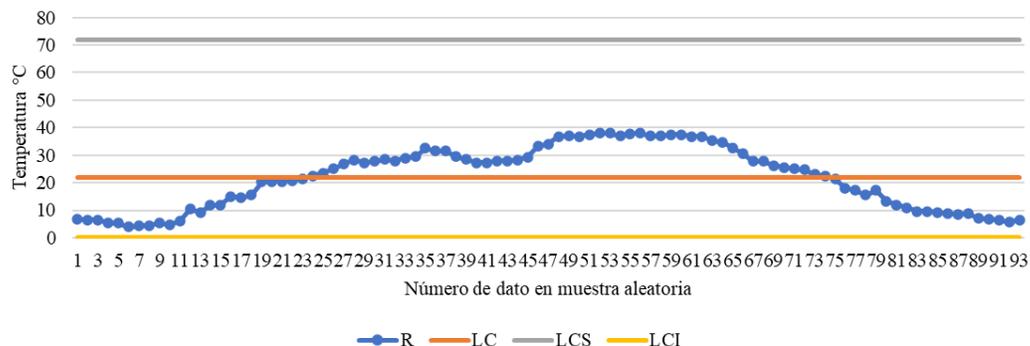
Zona 2 grafica de control de medias.



Nota. Se muestra la gráfica de control de medias de la zona de estudio 2 que se realizó en la resina WAX40. $LC=178.21$, $LCS=136.9$, $LCI=95.59$.

Figura 58

Zona 2 grafica de control de rangos.



Nota. Se muestra la gráfica de control de rangos de la zona de estudio 2 que se realizó en la resina WAX40.

En la Figura 57 se observa que el promedio de medias entre los 2 monitoreos usados se encuentra en los 136.9 °C. Con 13.1 °C por debajo del valor nominal al cual debe estar en esta Fase, sin embargo; si se observa la fase en la Figura, ya se ve de por sí que no hay la estabilidad deseada.

En la Figura 58 se observa que el sistema presenta una gran variación en los datos de los dos subgrupos, especialmente en el inicio y el final.

Fase 3: 300°C

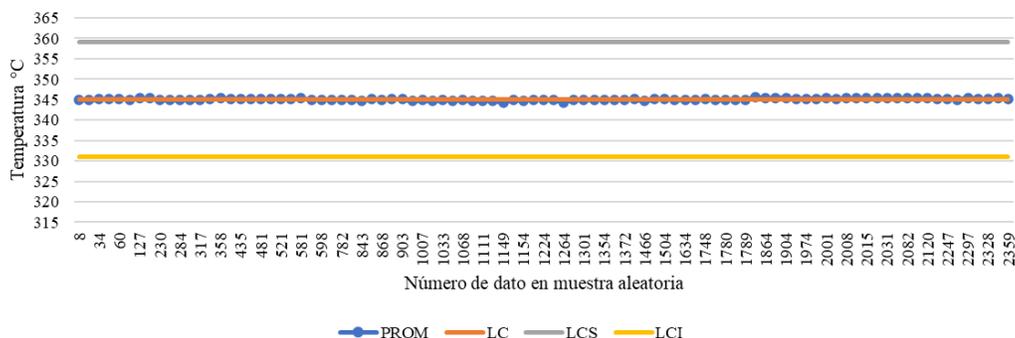
Se calcula una muestra de los 2386 datos que se encuentran en esta fase, a un nivel de confianza de 95% (puntuación $z=1.96$), con una margen de error de 10% y un p de 0.5.

$$Tm = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q} = \frac{2716 * 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}{0.1^2 * (2716 - 1) + 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)} \approx 93$$

Tomando la muestra de 93 datos en los 2 subgrupos. Se tiene las grafica de control de medias Figura 59 y la gráfica de control de rangos en la Figura 60.

Figura 59

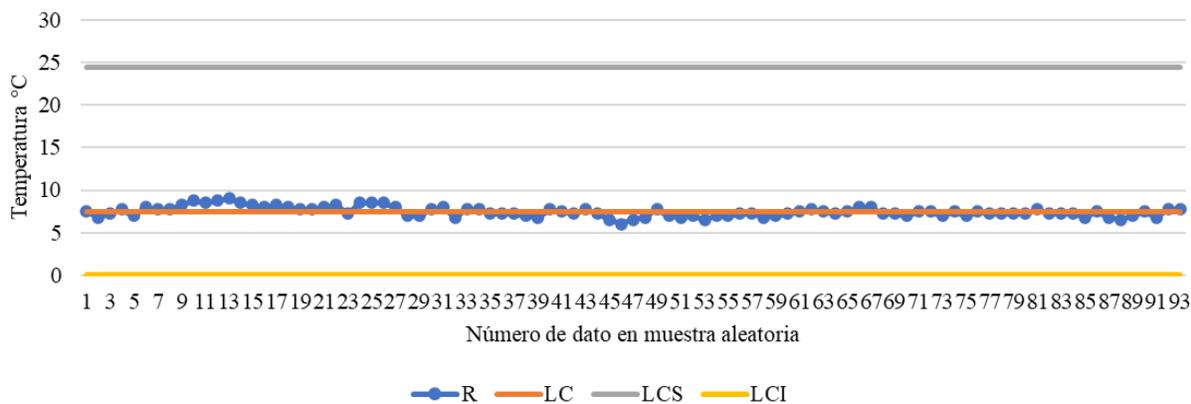
Zona 3 grafica de control de medias.



Nota. Se muestra la gráfica de control de medias de la zona de estudio 3 que se realizó en la resina WAX40. LC=345, LCS=359, LCI=331.

Figura 60

Zona 3 grafica de control de rangos.



Nota. Se muestra la gráfica de control de rangos de la zona de estudio 3 que se realizó en la resina WAX40.

En la Figura 59 se observa que el promedio de medias entre los 2 monitoreos usados se encuentra en los 345°C. Con 45 °C por encima del valor nominal al cual debe estar en esta

Fase, siendo una de las fases con más precisión, pero sin exactitud ya que el valor nominal teórico era de 300 °C

En la Figura 60 se observa que el sistema presenta poca variación en los datos de los dos subgrupos.

Fase 4: 790°C

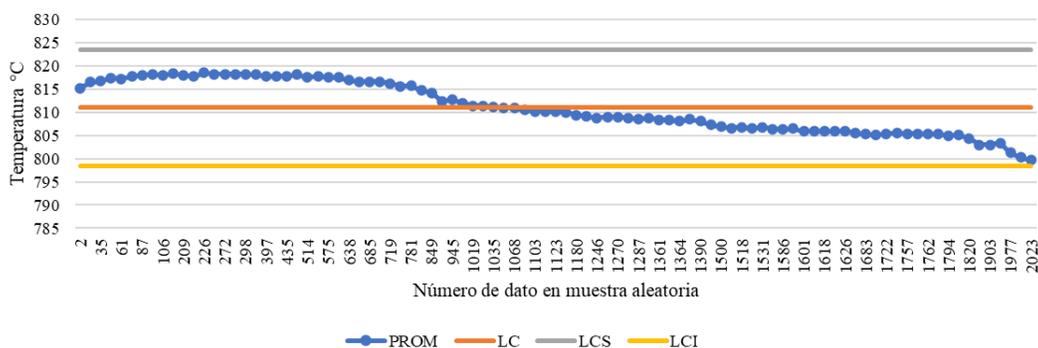
Se calcula una muestra de los 2386 datos que se encuentran en esta fase, a un nivel de confianza de 95% (puntuación $z=1.96$), con una margen de error de 10% y un p de 0.5.

$$T_m = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q} = \frac{2716 * 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}{0.1^2 * (2716 - 1) + 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)} \approx 93$$

Tomando la muestra de 93 datos en los 2 subgrupos. Se tiene las graficas de control de medias Figura 61 y la gráfica de control de rangos en la Figura 62.

Figura 61

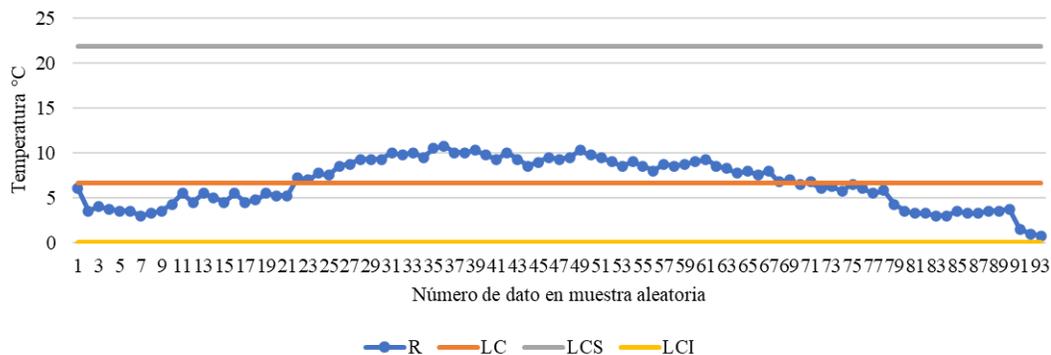
Zona 4 grafica de control de medias.



Nota. Se muestra la gráfica de control de medias de la zona de estudio 4 que se realizó en la resina WAX40. LC=811, LCS=823, LCI=798.

Figura 62

Zona 4 grafica de control de rangos.



Nota. Se muestra la gráfica de control de rangos de la zona de estudio 4 que se realizó en la resina WAX40.

En la Figura 61 se observa que el promedio de medias entre los 2 monitoreos usados se encuentra en los 811°C. Con 21 °C por encima del valor nominal al cual debe estar en esta Fase. Por lo demás a excepción de los primeros datos que se encuentran cercanos a la LCS y los últimos que se cercanos a la LCI, el sistema en los monitores se estabiliza sin ninguna variación grande.

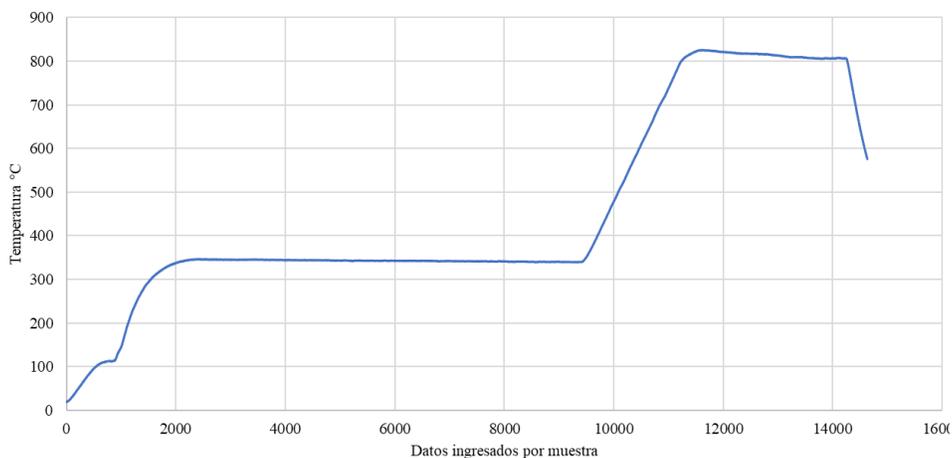
En la Figura 62 se observa que el sistema presenta poca variación en los datos de los dos subgrupos.

WAX RESIN

Para la resina WAX RESIN, se registró los siguientes datos implantados en la figura. La cual corresponde a la Figura de la tabla 5

Figura 63

Quemado de resina WAX RESIN L5-36 alimentadores.

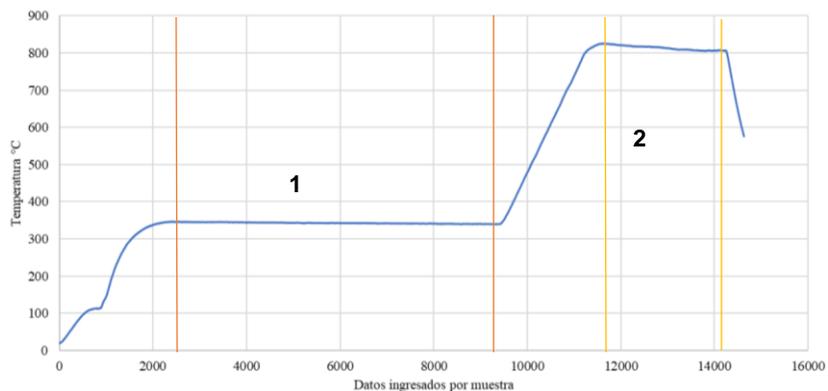


Nota. La imagen representa la curva de temperaturas registrada durante el quemado del cubilete con la resina WAX RESIN L10 con 36 alimentadores.

Para el análisis de esta gráfica y los datos, se procedió a realizar una división de segmentos para evaluar las etapas en donde la temperatura del horno alcanzaba un estado teórico de mantenimiento. Como se observa en la Figura 54, se dividió en 2 etapas en donde de acuerdo con la Tabla 3 el mantenimiento de la temperatura se registra en 300 y 790

Figura 64

División en zonas (Resina WAX RESIN L5-36).



Nota. La imagen muestra las zonas de estudio que se realizó para la carta de control de la resina WAX RESIN L5-36.

Fase 1: 300°C

Para la evaluación del tramo 1 se hizo una carta de control X-R, estableciendo los límites puestos en la figura, con datos pertenecientes a 2 monitoreos realizados con la misma resina.

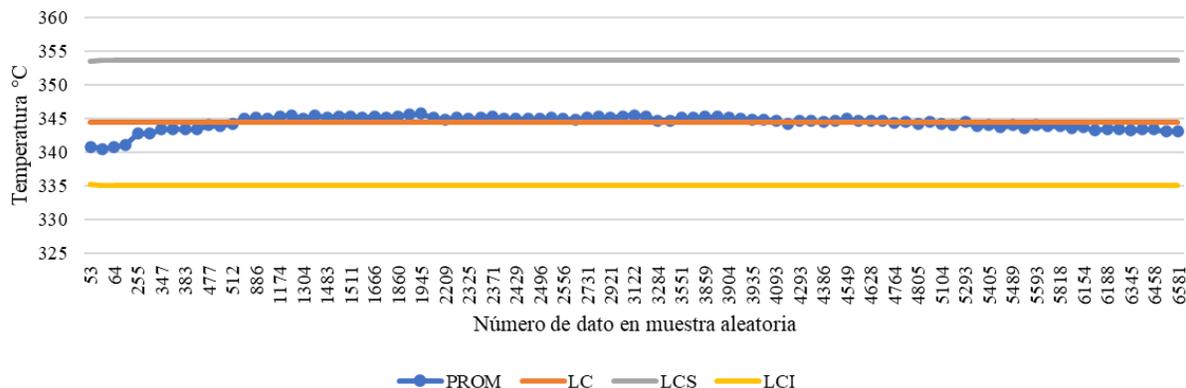
Se calcula una muestra de los 6763 datos que se encuentran en esta fase, a un nivel de confianza de 95% (puntuación $z = 1.96$), con una margen de error de 10% y un p de 0.5.

$$Tm = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q} = \frac{6763 * 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}{0.1^2 * (2716 - 1) + 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)} \approx 95$$

Tomando la muestra de 95 datos en los 2 subgrupos. Se tiene las grafica de control de medias Figura 65 y la gráfica de control de rangos en la Figura 66.

Figura 65

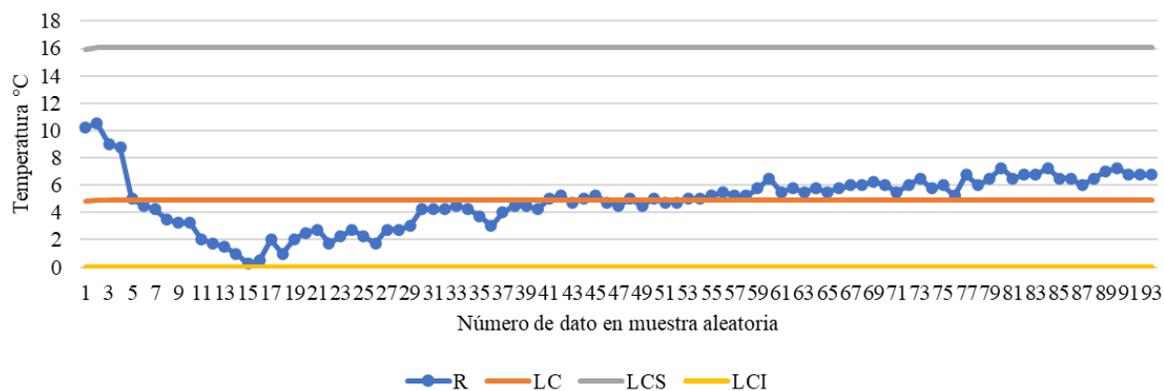
Zona 1 grafica de control de medias.



Nota. Se muestra la gráfica de control de medias de la zona de estudio 1 que se realizó en la resina WAXRESIN. LC=344, LCS=354, LCI=335.

Figura 66

Zona 1 grafica de control de rangos.



Nota. Se muestra la gráfica de control de rangos de la zona de estudio 1 que se realizó en la resina WAXRESIN.

En la Figura 65 se observa que el promedio de medias entre los 2 monitoreos usados se encuentra en los 344°C. Con 44 °C por encima del valor nominal al cual debe estar en esta Fase., siendo una de las fases con más precisión, pero sin exactitud ya que el valor nominal teórico era de 300 °C

En la Figura 66 se observa que el sistema presenta gran variación en la primera parte, esto debido a que el horno se estabilizo ligeramente más rápido en una muestra de datos del subgrupo.

Fase 2: 790°C

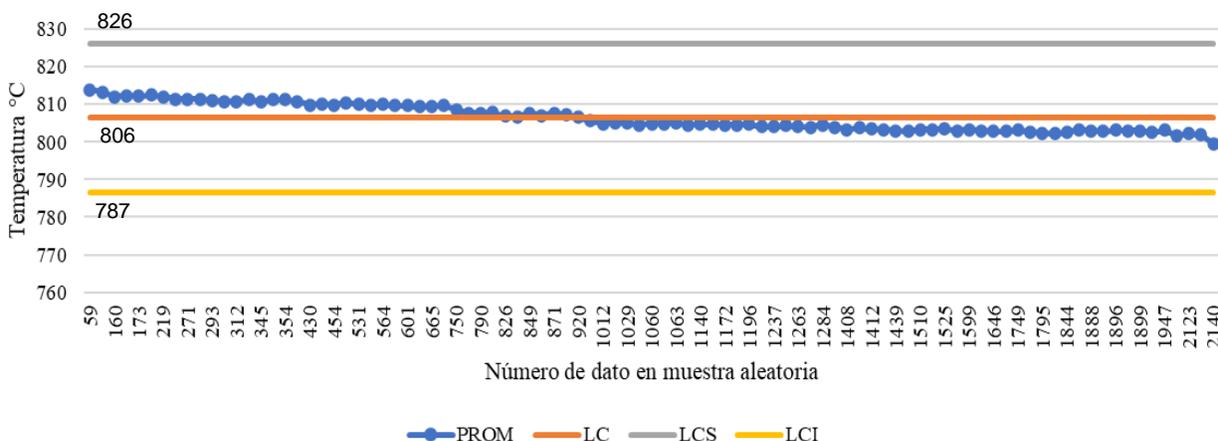
Se calcula una muestra de los 2176 datos que se encuentran en esta fase, a un nivel de confianza de 95% (puntuación $z=1.96$), con una margen de error de 10% y un p de 0.5.

$$Tm = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q} = \frac{2176 * 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}{0.1^2 * (2176 - 1) + 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)} \approx 93$$

Tomando la muestra de 93 datos en los 2 subgrupos. Se tiene las graficas de control de medias Figura 67 y la gráfica de control de rangos en la Figura 68.

Figura 67

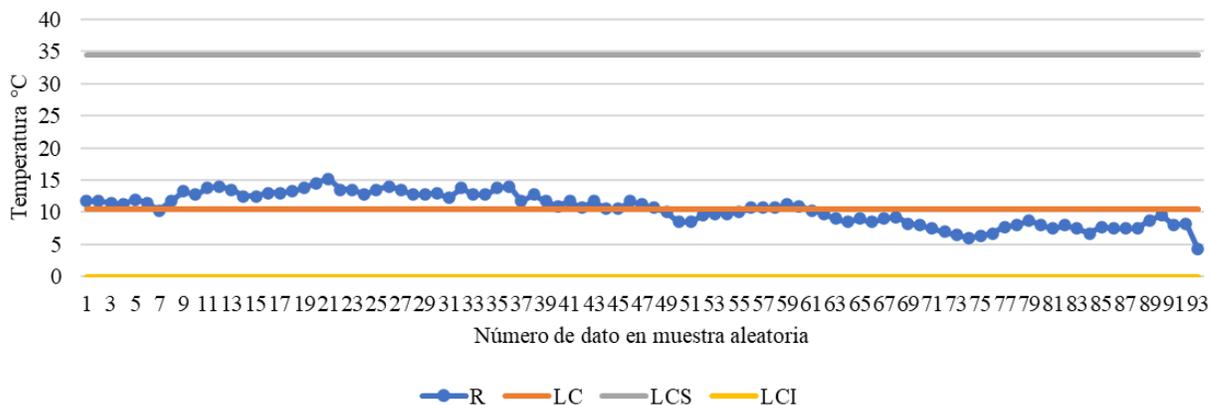
Zona 2 grafica de control de medias.



Nota. Se muestra la gráfica de control de medias de la zona de estudio 2 que se realizó en la resina WAXRESIN. LC=806, LCS=826, LCI=787.

Figura 68

Zona 2 grafica de control de rangos.



Nota. Se muestra la gráfica de control de rangos de la zona de estudio 2 que se realizó en la resina WAXRESIN.

En la Figura 67 se observa que el promedio de medias entre los 2 monitoreos usados se encuentra en los 806°C. Con 16 °C por encima del valor nominal al cual debe estar en esta Fase., sin embargo, hay precisión entre los 2 monitoreos realizados, ya que los datos están apegados a la media central.

En la Figura 68 se observa que el sistema presenta poca variación en los datos de los dos subgrupos.

Resumen y Análisis General

De las gráficas obtenidas y los datos recopilados se puede detallar que:

El quemado de la resina WAX40 sufre una falla de estabilidad en la zona, sin embargo, el error que se presenta en esa estancia resulta ser similar entre los 2 quemados monitoreados realizados para esa misma resina. Por lo que su grafica de control de medias y rangos no resulta fuera de los límites de control, pero presenta una variación persistente en el control de rangos

Tanto para la resina WAX40 y la resina WAXresin en el análisis de sus 2 monitores respectivos, se obtuvo graficas de control dentro de los rangos deseados, sin embargo, en la mayoría hay sesgos de entrada y salida. Esto debido a que el tiempo de estabilización entre los 2 monitoreos tiene sus diferencias respectivas debido a los tiempos de recolección de datos.

El quemado de la resina WAXresin resulto ser el más análogo al quemado teórico que debería darse en la misma. Y su estabilidad en las 2 zonas que se analizaron, presentan un buen rendimiento y control para los 2 monitoreos que se realizaron en esta.

Monitoreo de Fundición

Fundición a 150 °C en el Cubilete

Los datos tomados durante la fundición se ven representados en la Figura 69. En donde se muestra las fases a las que es sometido el cubilete.

Representado por la circunferencia número 1 en la Figura 69. se encuentra la fase de preenfriamiento, en donde el cubilete permanece en el horno hasta llegar a la temperatura adecuada para salir. En este caso es de 180 °C. (De acuerdo con el diseño experimental, el cubilete estaba marcado para salir a los 150 °C del horno, sin embargo, la temperatura interna del cubilete se encontraba a 180 °C)

Representado por la circunferencia número 2 en la Figura 69. se encuentra la fase de extracción en donde el cubilete es extraído del horno, y se somete a la temperatura ambiental. El cubilete en esta instancia baja a una temperatura de 130 °C antes de verter el metal en el mismo.

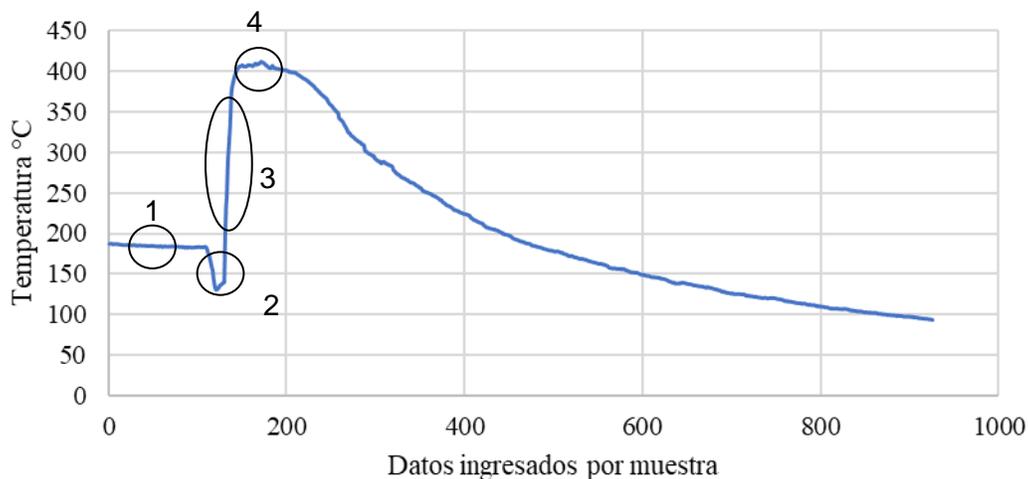
Representado por la circunferencia número 3 en la Figura 69. se encuentra la fase de fundición en donde se vierte el aluminio dentro del cubilete y experimenta una rampa creciente instantánea.

Representado por la circunferencia número 4 en la Figura 69. se encuentra la fase final en donde el cubilete llega a la temperatura máxima de 412, para posteriormente comenzar con el enfriamiento

Se prevé que el cubilete llegue hasta los 50 °C a temperatura ambiente para posteriormente ingresarlo al agua. Donde terminará de enfriarse y el material cerámico podrá ser desmenuzado de la pieza final

Figura 69

Monitoreo de fundición 150 °C



Nota. Se muestra la gráfica que trazan los puntos que se monitorean durante el vertimiento del aluminio en el cubilete

Fundición a 345 °C en el Cubilete

Los datos tomados durante la fundición se ven representados en la Figura 54. En donde se muestra las fases a las que es sometido el cubilete.

Representado por la circunferencia número 1 en la Figura 70. se encuentra la fase de preenfriamiento, en donde el cubilete permanece en el horno hasta llegar a la temperatura adecuada para salir. En este caso es de 400 °C. (De acuerdo con el diseño experimental, el cubilete estaba marcado para salir a los 345 °C del horno, sin embargo, la temperatura interna del cubilete se encontraba a 400 °C)

Representado por la circunferencia número 2 en la Figura 70. se encuentra la fase de extracción en donde el cubilete es extraído del horno, y se somete a la temperatura ambiental.

El cubilete en esta instancia baja a una temperatura de 357 °C antes de verter el metal en el mismo.

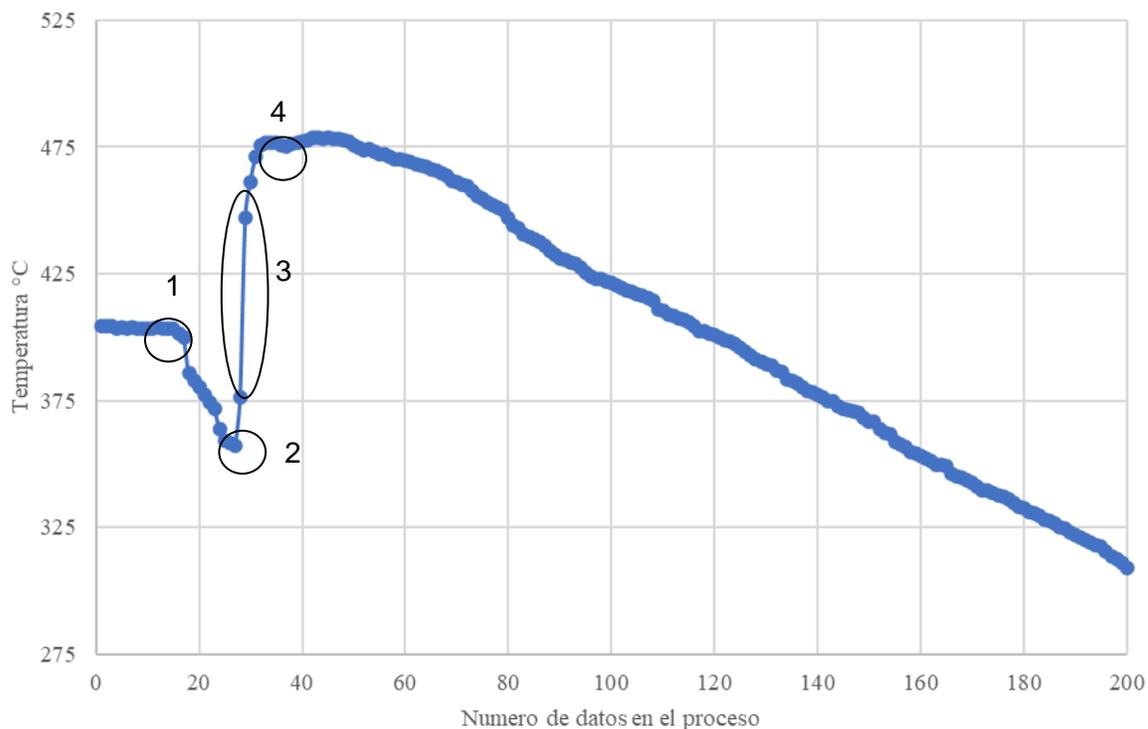
Representado por la circunferencia número 3 en la Figura 70. se encuentra la fase de fundición en donde se vierte el aluminio dentro del cubilete y experimenta una rampa creciente instantánea.

Representado por la circunferencia número 4 en la Figura 70. se encuentra la fase final en donde el cubilete llega a la temperatura máxima de 478.75, para posteriormente comenzar con el enfriamiento

Se prevé que el cubilete llegue hasta los 50 °C a temperatura ambiente para posteriormente ingresarlo al agua. Donde terminará de enfriarse y el material cerámico podrá ser desmenuzado de la pieza final

Figura 70

Monitoreo de fundición 345 °C



Nota. Se muestra la gráfica que trazan los puntos que se monitorean durante el vertimiento del aluminio en el cubilete

Fundición a 540 °C en el Cubilete

Los datos tomados durante la fundición se ven representados en la Figura 54. En donde se muestra las fases a las que es sometido el cubilete.

Representado por la circunferencia número 1 en la Figura 71. se encuentra la fase de preenfriamiento, en donde el cubilete permanece en el horno hasta llegar a la temperatura adecuada para salir. En este caso es de 580 °C. (De acuerdo con el diseño experimental, el cubilete estaba marcado para salir a los 540 °C del horno, sin embargo, la temperatura interna del cubilete se encontraba a 580 °C)

Representado por la circunferencia número 2 en la Figura 71. se encuentra la fase de extracción en donde el cubilete es extraído del horno, y se somete a la temperatura ambiental. El cubilete en esta instancia baja a una temperatura de 525 °C antes de verter el metal en el mismo.

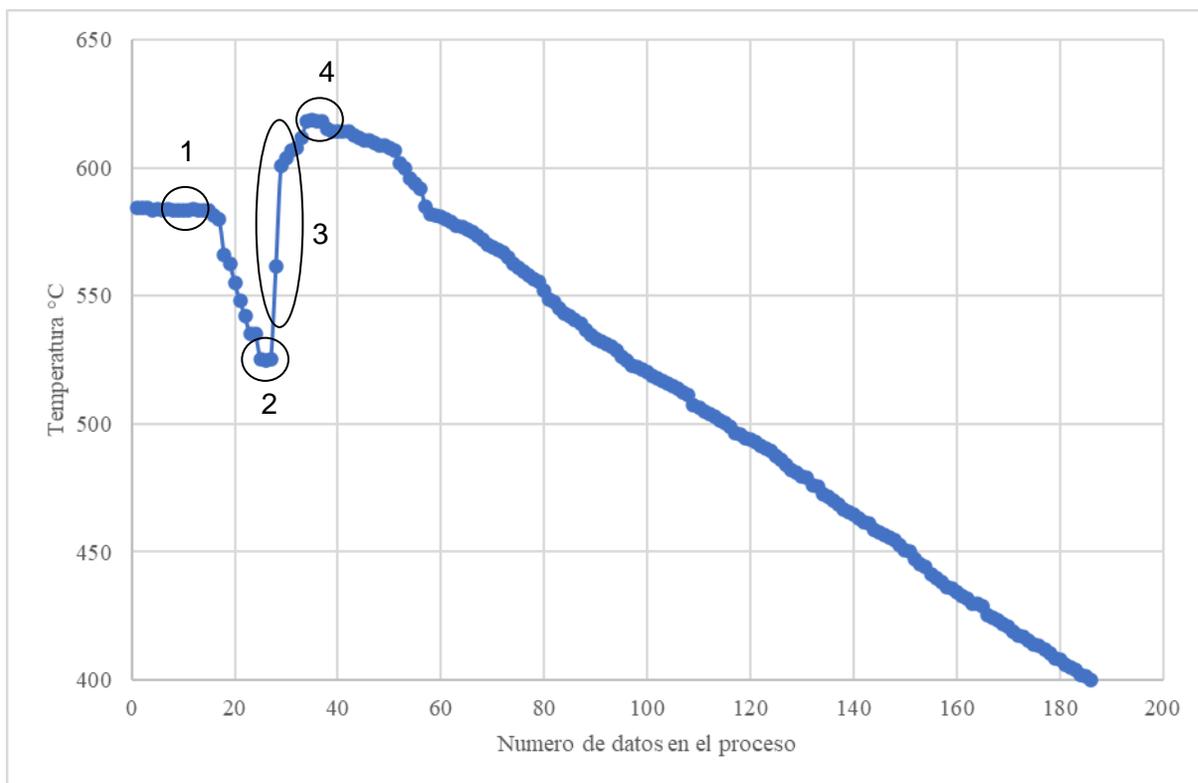
Representado por la circunferencia número 3 en la Figura 71. se encuentra la fase de fundición en donde se vierte el aluminio dentro del cubilete y experimenta una rampa creciente instantánea.

Representado por la circunferencia número 4 en la Figura 71. se encuentra la fase final en donde el cubilete llega a la temperatura máxima de 618.5, para posteriormente comenzar con el enfriamiento

Se prevé que el cubilete llegue hasta los 50 °C a temperatura ambiente para posteriormente ingresarlo al agua. Donde terminará de enfriarse y el material cerámico podrá ser desmenuzado de la pieza final

Figura 71

Monitoreo de fundición 540 °C



Nota. Se muestra la gráfica que trazan los puntos que se monitorean durante el vertimiento del aluminio en el cubilete

Resumen y Análisis General

La Tabla 22 muestra un resumen de los datos obtenidos en la fundición. Se puede observar lo siguiente:

Tabla 22

Cálculo de errores en la fase de fundición

Temperatura de extracción [°C] teórica	Temperatura a la que empezó la fundición	Error porcentual
150	130	13.3 %
345	357	3.47 %
540	525	2.7%

Nota. La tabla muestra el error de temperatura al cual se inició la fundición de acuerdo con el diseño experimental

De las gráficas obtenidas y los datos recopilados se puede detallar que:

- Al ser sacado el cubilete del horno, este sufre un descenso de temperatura pronunciado debido a que el medio ambiente en promedio se encontraba a 20 °C
- La caída de temperatura en la extracción se muestra más pronunciada en el experimento fundido a 540 °C
- Aunque se sabe que la fundición del aluminio es a 660 °C, se observa que el molde no llega a esa temperatura
- Se observa también que mientras más elevada es la temperatura de extracción, hay una menor variación entre la temperatura de salida del horno y el pico de temperatura
- El enfriamiento del cubilete se da de forma exponencial inversa

Monitoreo de Funcionalidad

Para probar la funcionalidad de los intercambiadores de calor TPMS fundidos, se hizo uso del banco de pruebas realizado por (Andrade, 2022); en donde se usa la convección forzada para transportar el fluido (aire) a 2 velocidades que son de 2.6 y 6 m/s. Con una celda de peltier que será la encargada de transmitir el calor al TMPS elevando su temperatura hasta aproximadamente 50 °C. Y de esta manera poder medir el diferencial de temperatura y presión que hay a la entrada y salida del TPMS.

Las pruebas se realizaron con un intercambiador de calor comercial y los 3 tipos de TPMS fundidas L5, L10 y L15 a 2.6 y 6 m/s, tomando en cuenta la orientación de los orificios de la TPMS; inclinando estas a 0° y a 45° en la estructura del banco, tal como se verá a continuación.

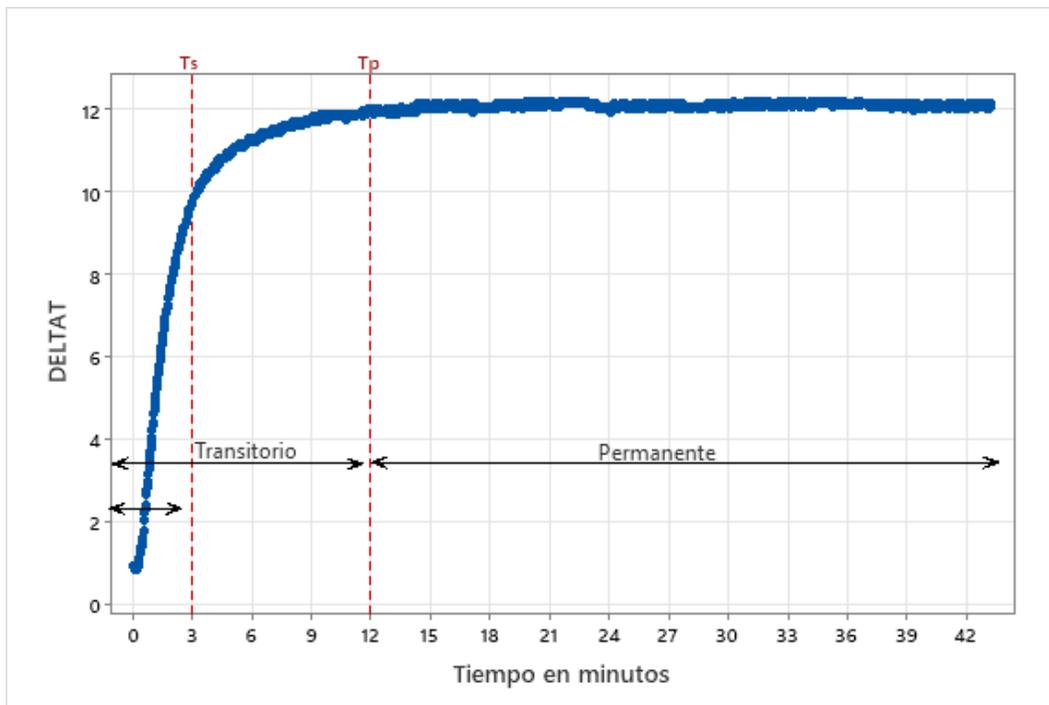
Prueba Intercambiador de Calor Comercial

Velocidad 2.6m/s

El intercambiador de calor comercial fue introducido en el banco de pruebas, en donde se realizó un gráfico de serie de tiempo (Figura 72), para verificar la evolución de la variación de temperatura. Se observa que el tiempo que tarda el intercambiador en tener su curva ascendente de variación de temperatura (T_s) es de aproximadamente 3 minutos y el tiempo que tarde en llegar a su estado estable (T_p) es de aproximadamente 12 minutos.

Figura 72

Serie de tiempo de la variación de temperatura en el intercambiador de calor comercial a 2.6 m/s



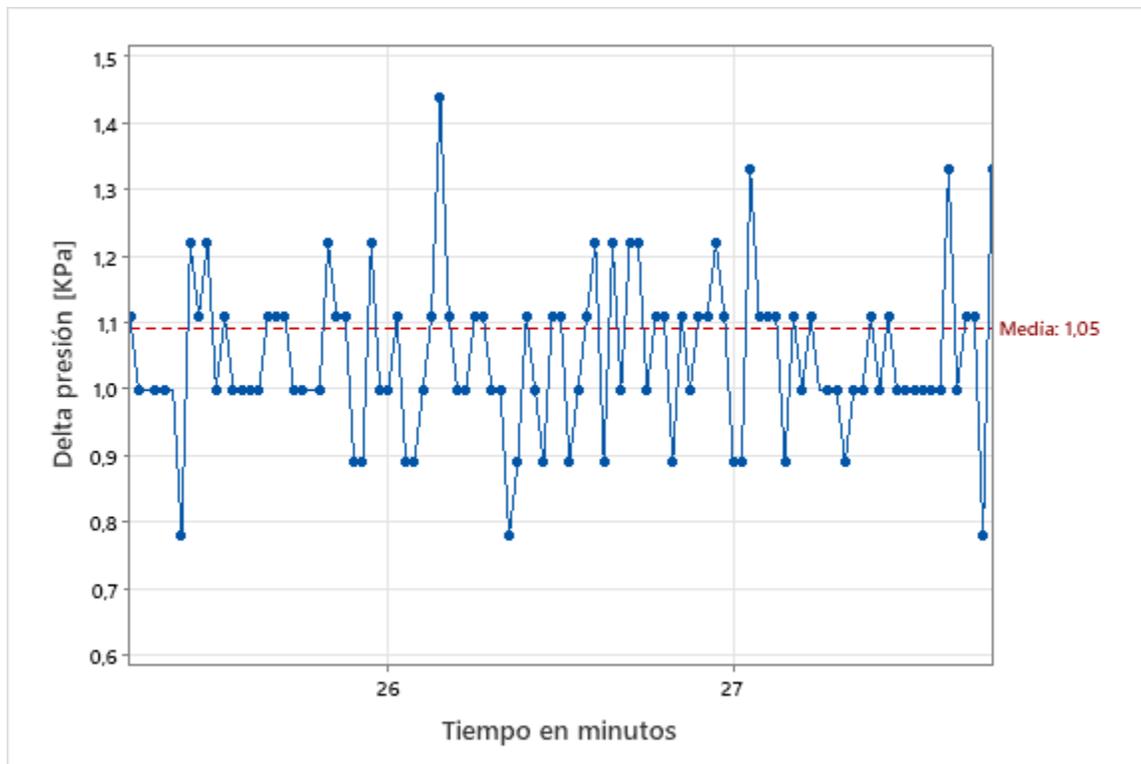
Nota. La imagen muestra la variación de la temperatura en el intercambiador de calor comercial con velocidad de aire de 2.6 m/s; con los distintos tiempos que presenta: T_s =tiempo de subida, T_p =tiempo de establecimiento. Así como también sus estados: Estado transitorio y permanente.

Esta TPMS presenta un pico máximo de variación de **12.1 °C**

Para la gráfica de la variación de presión mostrado en la Figura 73, se extrajo una región del estado permanente en donde el delta de temperatura es estable.

Figura 73

Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L5 a 2.6 m/s



Nota. La imagen muestra la variación de la presión el intercambiador de calor comercial con velocidad de aire de 2.6 m/s. Tomado de una parte de la región del estado estable en el minuto 25 al 28

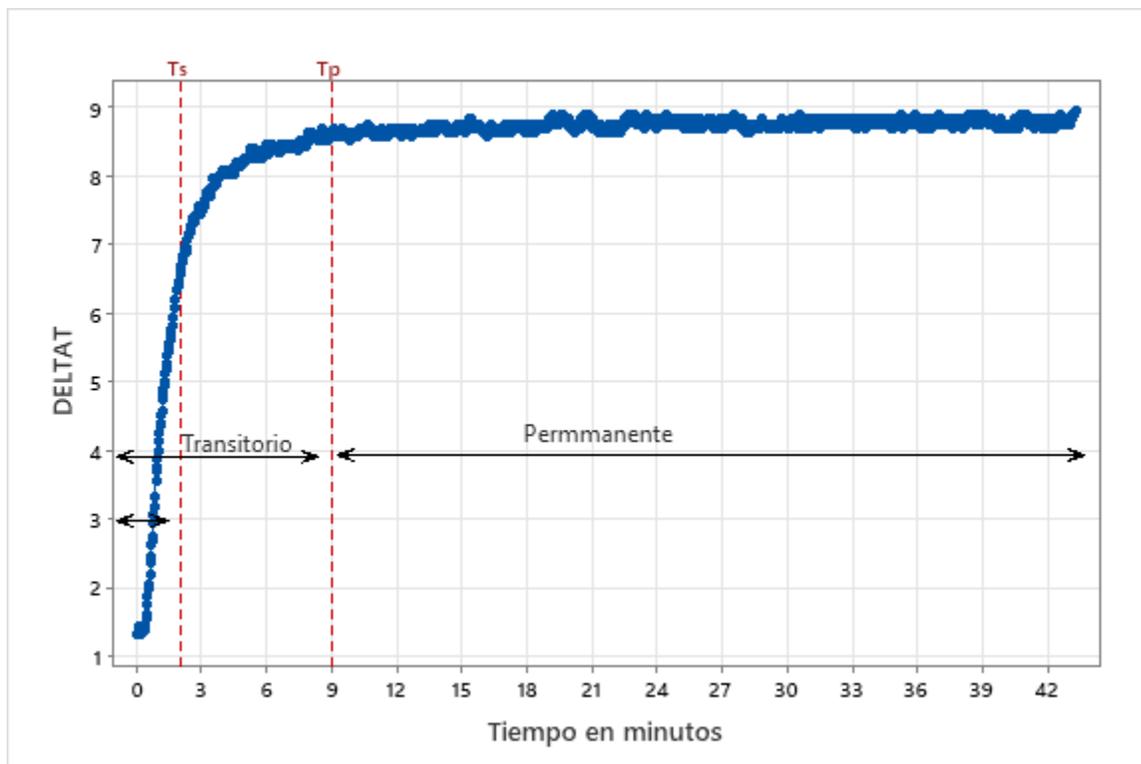
La variación de presión tiene una media de 1.05 KPa cuando el proceso se encuentre en la región de estado permanente

Velocidad 6m/s

La serie de tiempo (Figura 74) muestra una curva ascendente de variación de temperatura (T_s) de aproximadamente 2 minutos y el tiempo que tarde en llegar a su estado estable (T_p) es de aproximadamente 9 minutos.

Figura 74

Serie de tiempo de la variación de temperatura en el intercambiador de calor comercial a 6 m/s



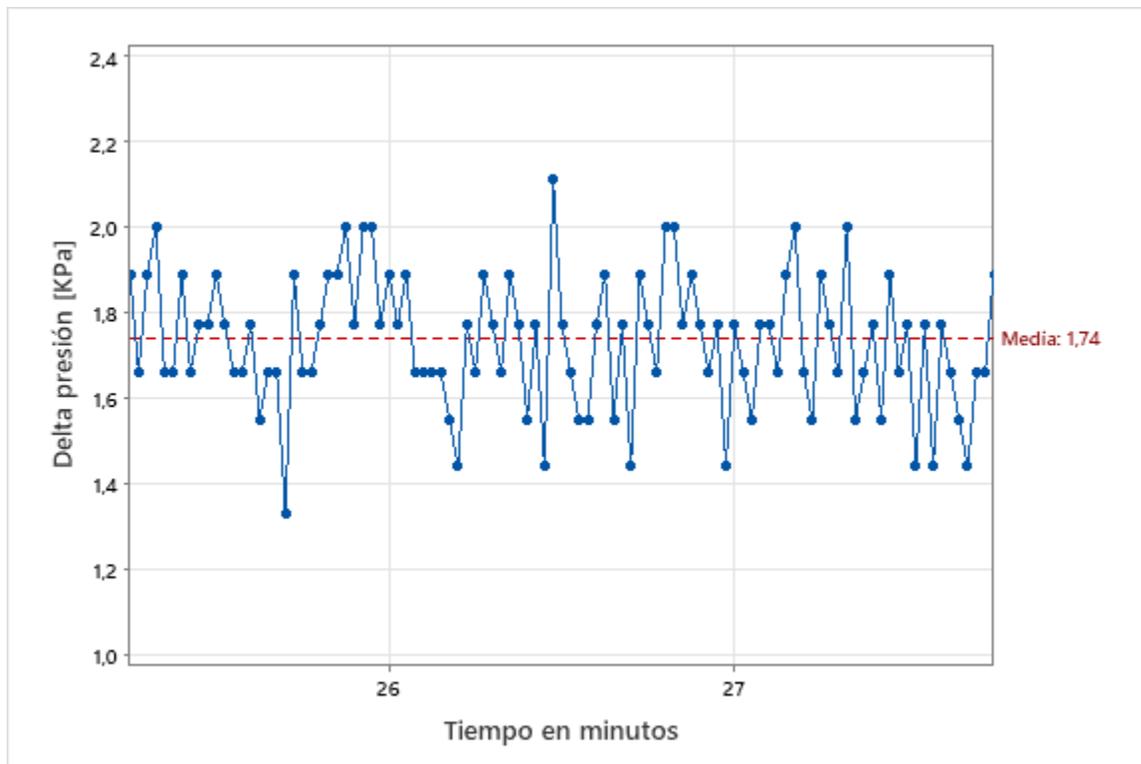
Nota. La imagen muestra la variación de la temperatura en el intercambiador de calor comercial con velocidad de aire de 6 m/s; con los distintos tiempos que presenta: T_s =tiempo de subida, T_p =tiempo de establecimiento. Así como también sus estados: Estado transitorio y permanente.

Esta TPMS presenta un pico máximo de variación de **8.93 °C**

Para la gráfica de la variación de presión mostrado en la Figura 75, se extrajo una región del estado permanente en donde el delta de temperatura es estable.

Figura 75

Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L5 a 2.6 m/s



Nota. La imagen muestra la variación de la presión el intercambiador de calor comercial con velocidad de aire de 6 m/s. Tomado de una parte de la región del estado estable en el minuto 25 al 28

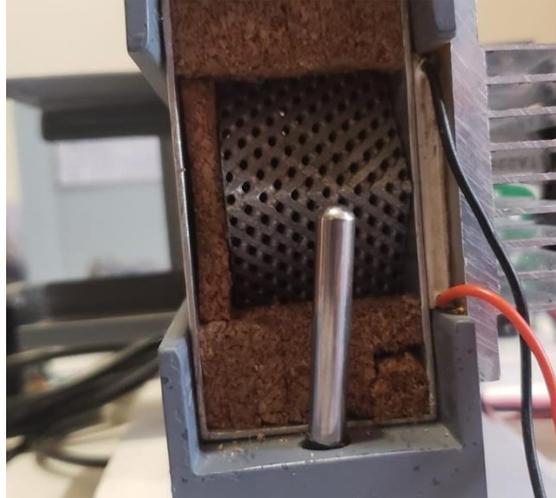
La variación de presión tiene una media de 1.74 KPa cuando el proceso se encuentre en la región de estado permanente

Prueba L5 Orientación 45°

La TPMS fue ubicada en el banco de pruebas tal como se ve en la figura. Con la dirección de sus orificios, en forma lineal al flujo del aire para realizar las respectivas pruebas a 2.6 y 6 m/s.

Figura 76

Prueba de TPMS L5 45°



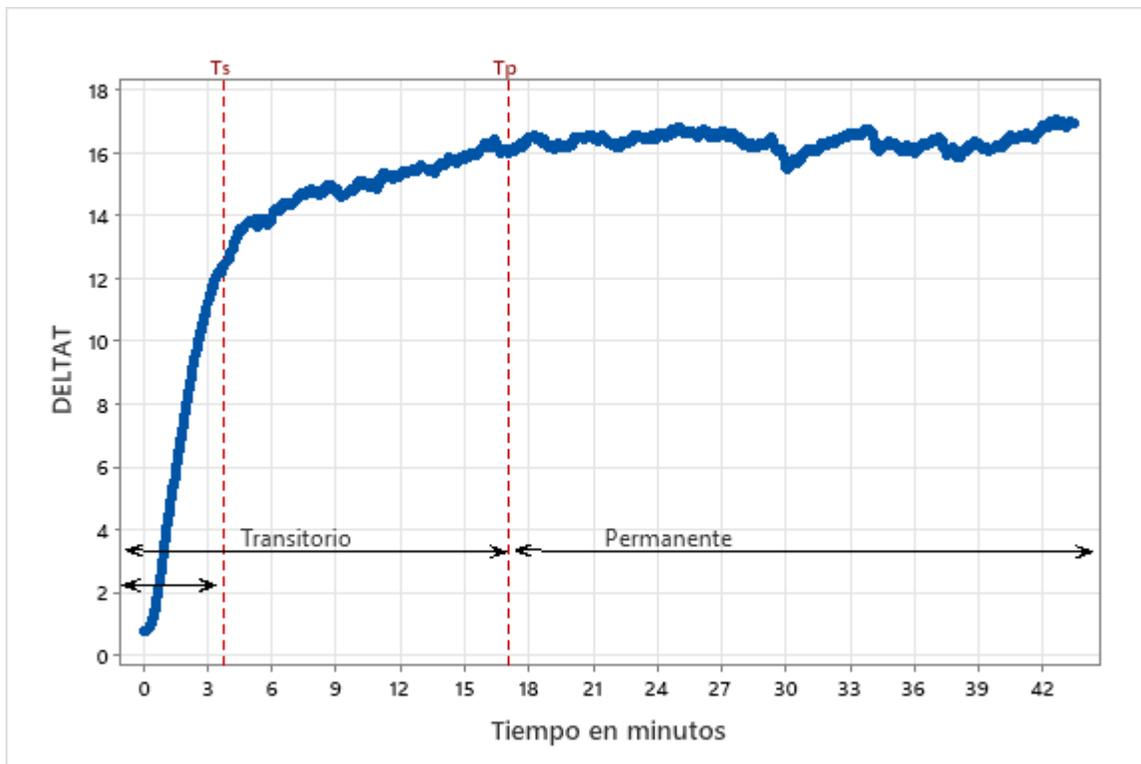
Nota. La imagen muestra, el intercambiador TPMS ubicado en el banco de pruebas a una inclinación de 45 °.

Velocidad 2.6m/s

Se realizó una serie de tiempo (Figura 77), para verificar la evolución de la variación de temperatura. Se observa que el tiempo que tarda la TPMS en tener su curva ascendente de variación de temperatura (T_s) es de aproximadamente 4 minutos y el tiempo que tarda en llegar a su estado estable (T_p) es de aproximadamente 17 minutos.

Figura 77

Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L5 a 2.6 m/s



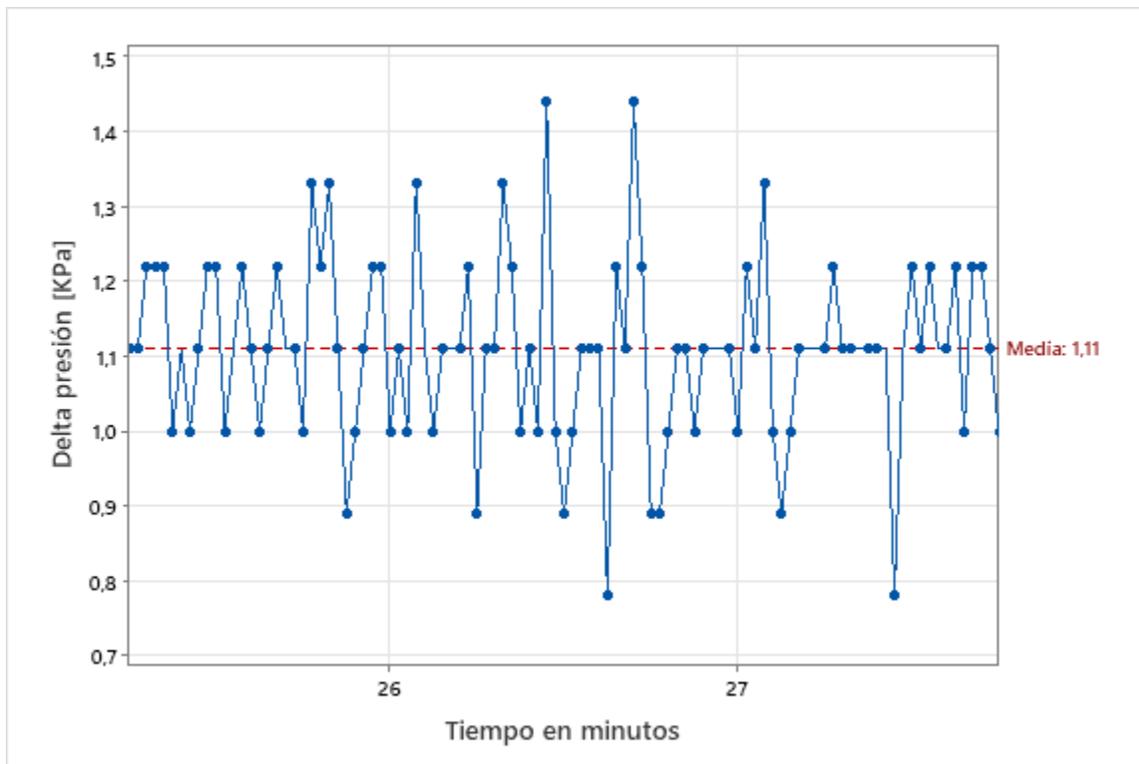
Nota. La imagen muestra la variación de la temperatura en la TPMS L5 con velocidad de aire de 2.6 m/s; con los distintos tiempos que presenta: T_s =tiempo de subida, T_p =tiempo de establecimiento. Así como también sus estados: Estado transitorio y permanente.

Esta TPMS presenta un pico máximo de variación de **17 °C**

Para la gráfica de la variación de presión mostrado en la Figura 78, se extrajo una región del estado permanente en donde el delta de temperatura es estable.

Figura 78

Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L5 a 2.6 m/s



Nota. La imagen muestra la variación de la presión en la TPMS L5 con velocidad de aire de 2.6 m/s. Tomado de una parte de la región del estado estable en el minuto 25 al 28

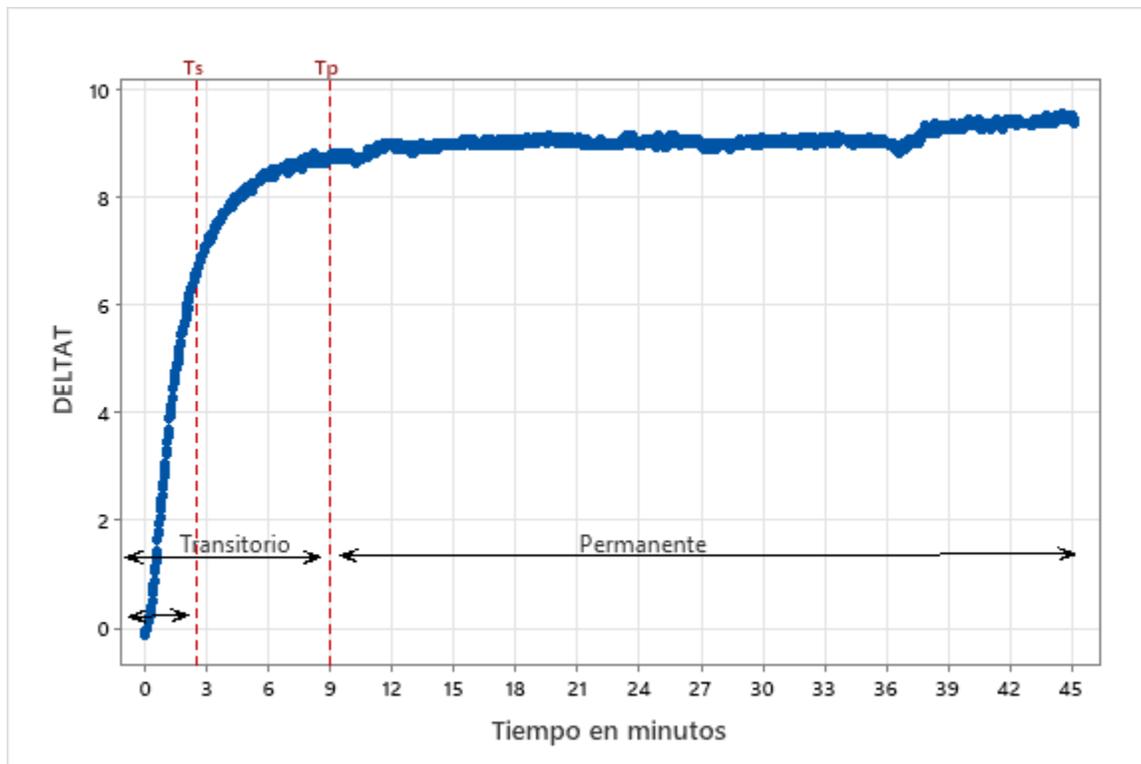
La variación de presión tiene una media de 1.11 KPa cuando el proceso se encuentre en la región de estado permanente

Velocidad 6 m/s

La serie de tiempo (Figura 79) muestra una curva ascendente de variación de temperatura (T_s) de aproximadamente 2.5 minutos y el tiempo que tarde en llegar a su estado estable (T_p) es de aproximadamente 9 minutos.

Figura 79

Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L5 a 6 m/s



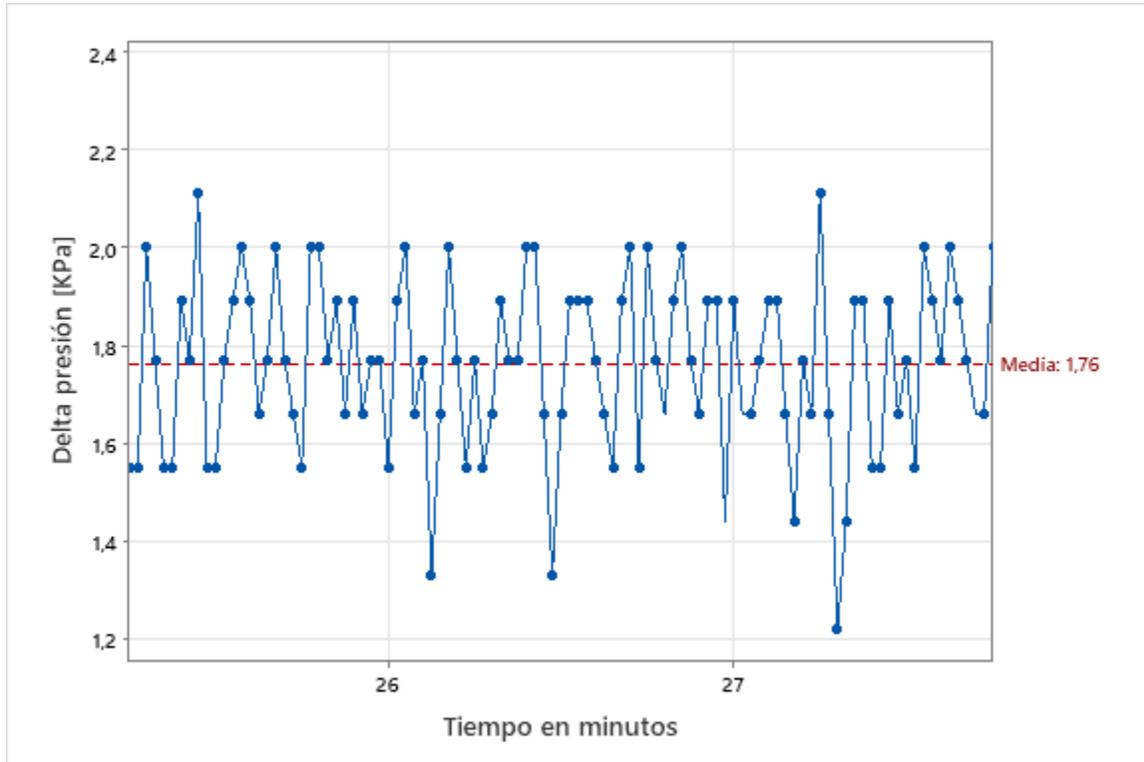
Nota. La imagen muestra la variación de la temperatura en la TPMS L5 con velocidad de aire de 6 m/s; con los distintos tiempos que presenta: T_s =tiempo de subida, T_p =tiempo de establecimiento. Así como también sus estados: Estado transitorio y permanente.

Esta TPMS presenta un pico máximo de variación de **9.56 °C**

Para la gráfica de la variación de presión mostrado en la Figura 80, se extrajo una región del estado permanente en donde el delta de temperatura es estable.

Figura 80

Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L5 a 6 m/s



Nota. La imagen muestra la variación de la presión en la TPMS L5 con velocidad de aire de 6 m/s. Tomado de una parte de la región del estado estable en el minuto 25 al 28

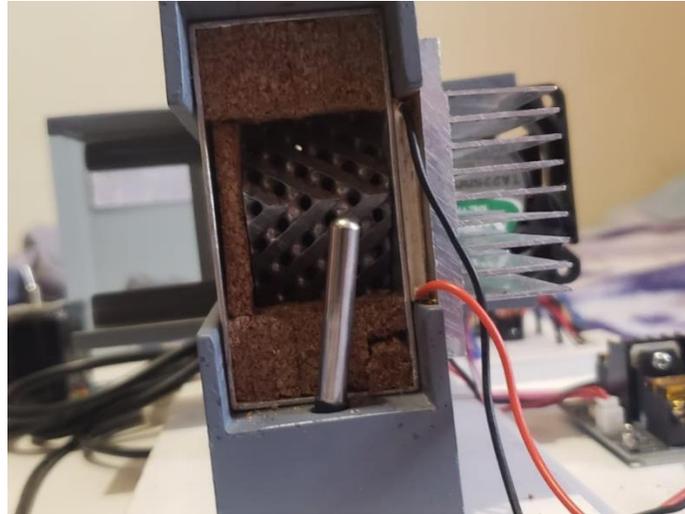
La variación de presión tiene una media de 1.76 KPa cuando el proceso se encuentre en la región de estado permanente

Prueba L10 Orientación 45°

La TPMS fue ubicada en el banco de pruebas tal como se ve en la figura. Con la dirección de sus orificios, en forma lineal al flujo del aire.

Figura 81

Prueba de TPMS L10 45°



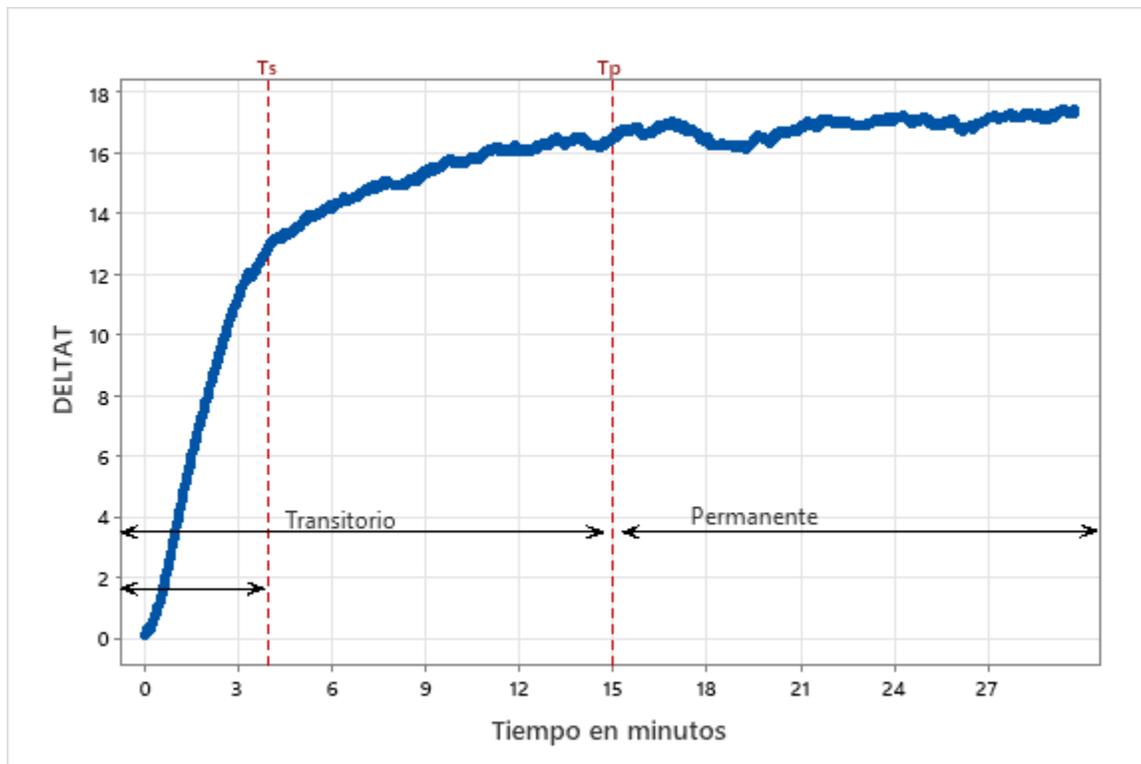
Nota. La imagen muestra, el intercambiador TPMS ubicado en el banco de pruebas a una inclinación de 45 °.

Velocidad 2.6 m/s

La serie de tiempo (Figura 82) muestra una curva ascendente de variación de temperatura (T_s) de aproximadamente 4 minutos y el tiempo que tarde en llegar a su estado estable (T_p) es de aproximadamente 15 minutos.

Figura 82

Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L10 a 2.6 m/s



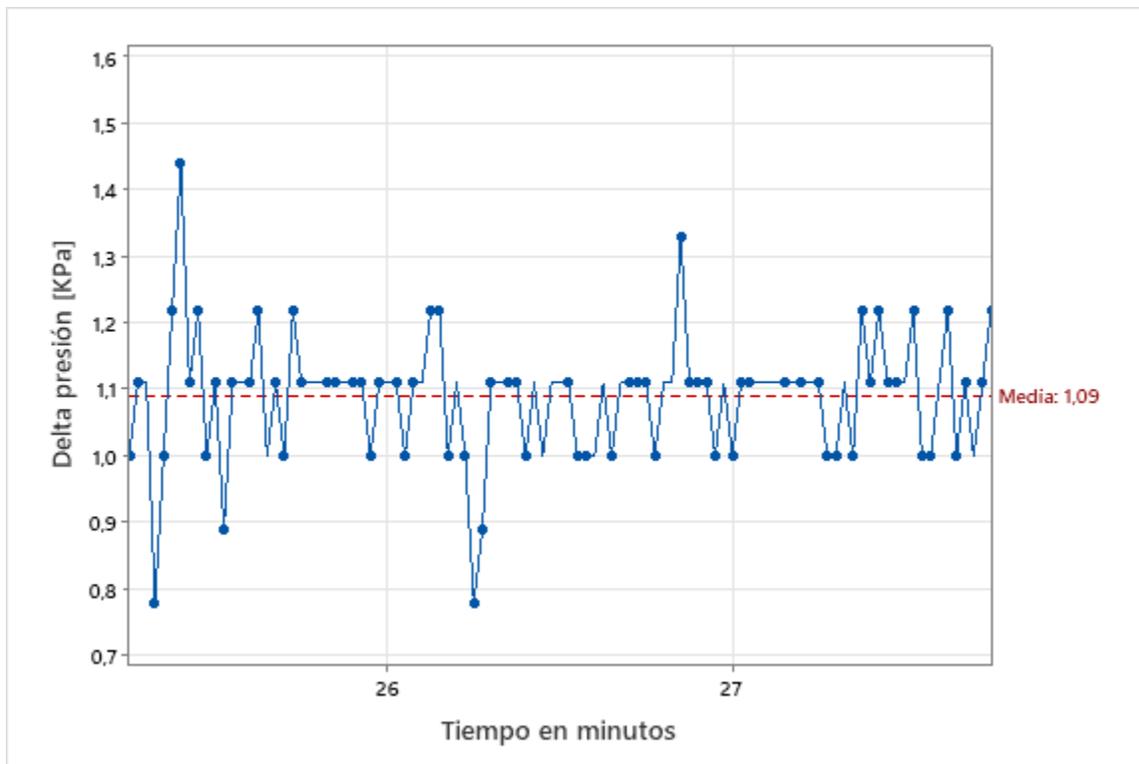
Nota. La imagen muestra la variación de la temperatura en la TPMS L10 con velocidad de aire de 2.6 m/s; con los distintos tiempos que presenta: T_s =tiempo de subida, T_p =tiempo de establecimiento. Así como también sus estados: Estado transitorio y permanente.

Esta TPMS presenta un pico máximo de variación de **17.38 °C**

Para la gráfica de la variación de presión mostrado en la Figura 83, se extrajo una región del estado permanente en donde el delta de temperatura es estable.

Figura 83

Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L10 a 2.6 m/s



Nota. La imagen muestra la variación de la presión en la TPMS L10 con velocidad de aire de 2.6 m/s. Tomado de una parte de la región del estado estable en el minuto 25 al 28

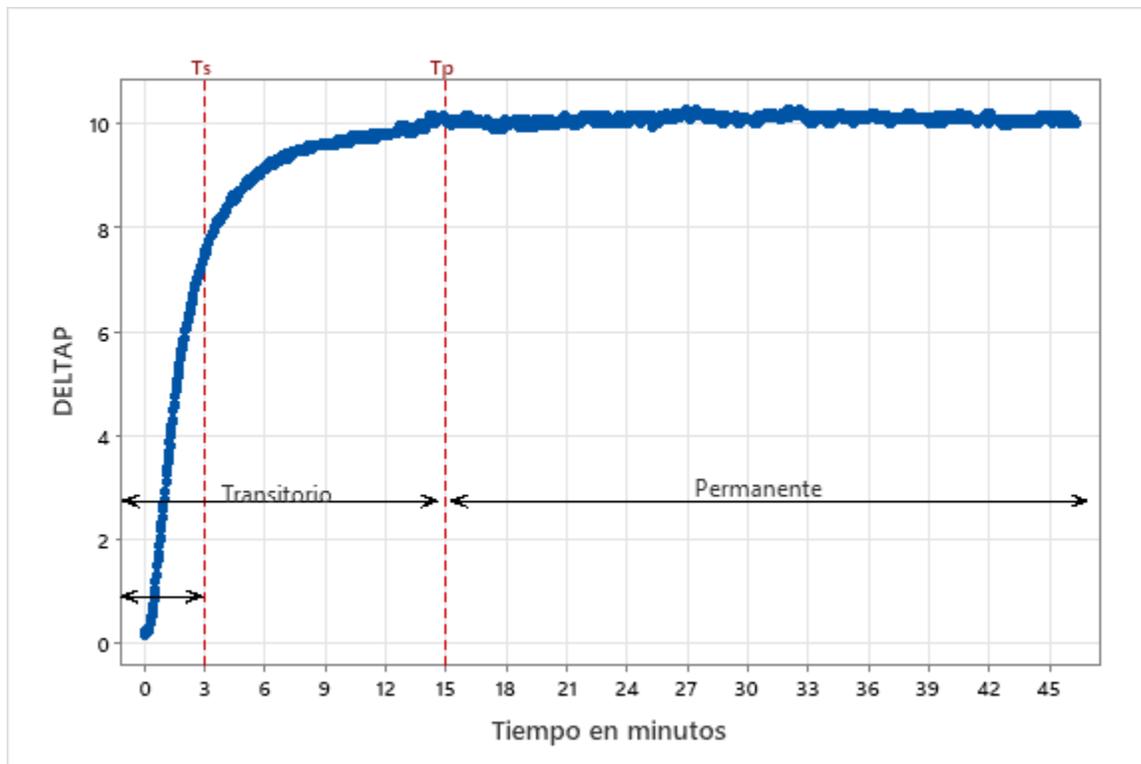
La variación de presión tiene una media de 1.09 KPa cuando el proceso se encuentre en la región de estado permanente

Velocidad 6 m/s

La serie de tiempo (Figura 84) muestra una curva ascendente de variación de temperatura (T_s) de aproximadamente 3 minutos y el tiempo que tarde en llegar a su estado estable (T_p) es de aproximadamente 15 minutos.

Figura 84

Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L5 a 6 m/s



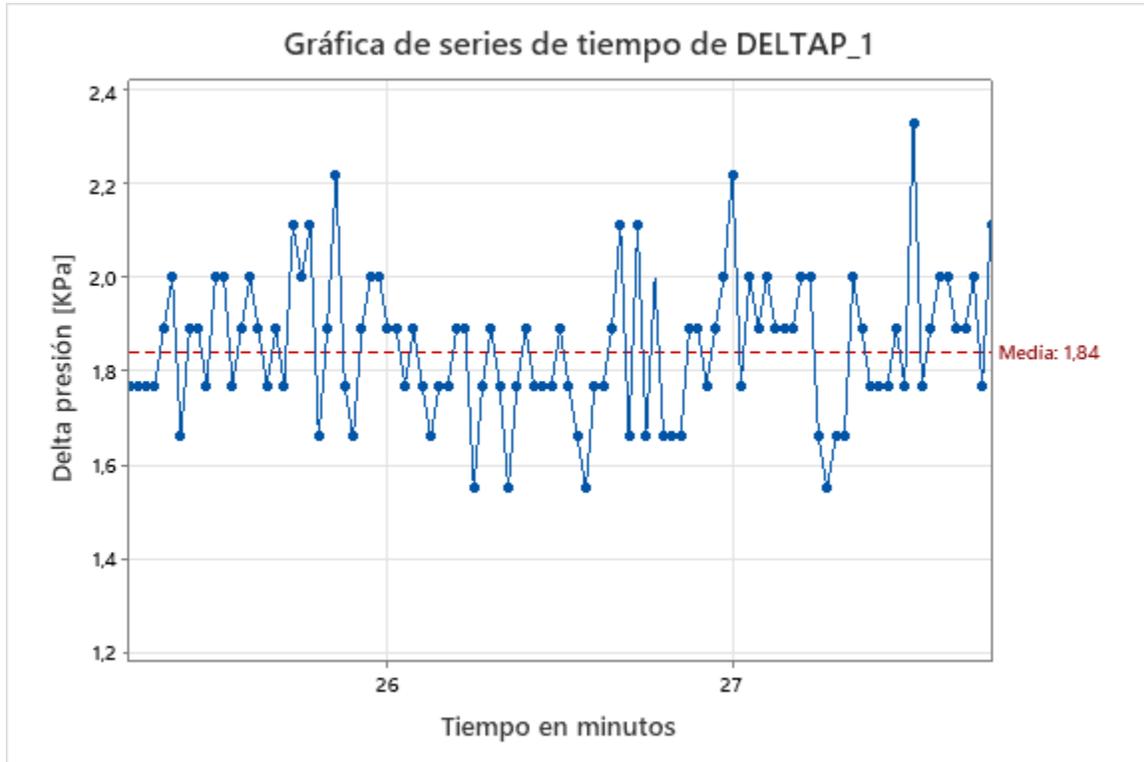
Nota. La imagen muestra la variación de la temperatura en la TPMS L10 con velocidad de aire de 6 m/s; con los distintos tiempos que presenta: T_s =tiempo de subida, T_p =tiempo de establecimiento. Así como también sus estados: Estado transitorio y permanente.

Esta TPMS presenta un pico máximo de variación de **10.25 °C**

Para la gráfica de la variación de presión mostrado en la Figura 85, se extrajo una región del estado permanente en donde el delta de temperatura es estable.

Figura 85

Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L10 a 6 m/s



Nota. La imagen muestra la variación de la presión en la TPMS L10 con velocidad de aire de 6 m/s. Tomado de una parte de la región del estado estable en el minuto 25 al 28

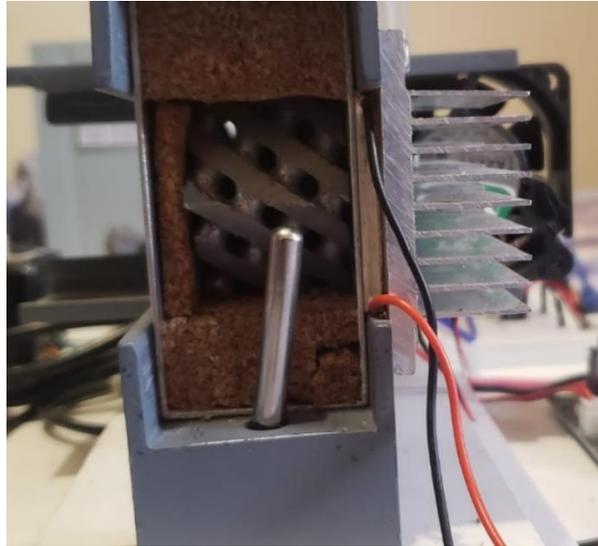
La variación de presión tiene una media de 1.84 KPa cuando el proceso se encuentre en la región de estado permanente

Prueba L15 Orientación 45°

La TPMS fue ubicada en el banco de pruebas tal como se ve en la figura. Con la dirección de sus orificios, en forma lineal al flujo del aire.

Figura 86

Prueba de TPMS L15 45°



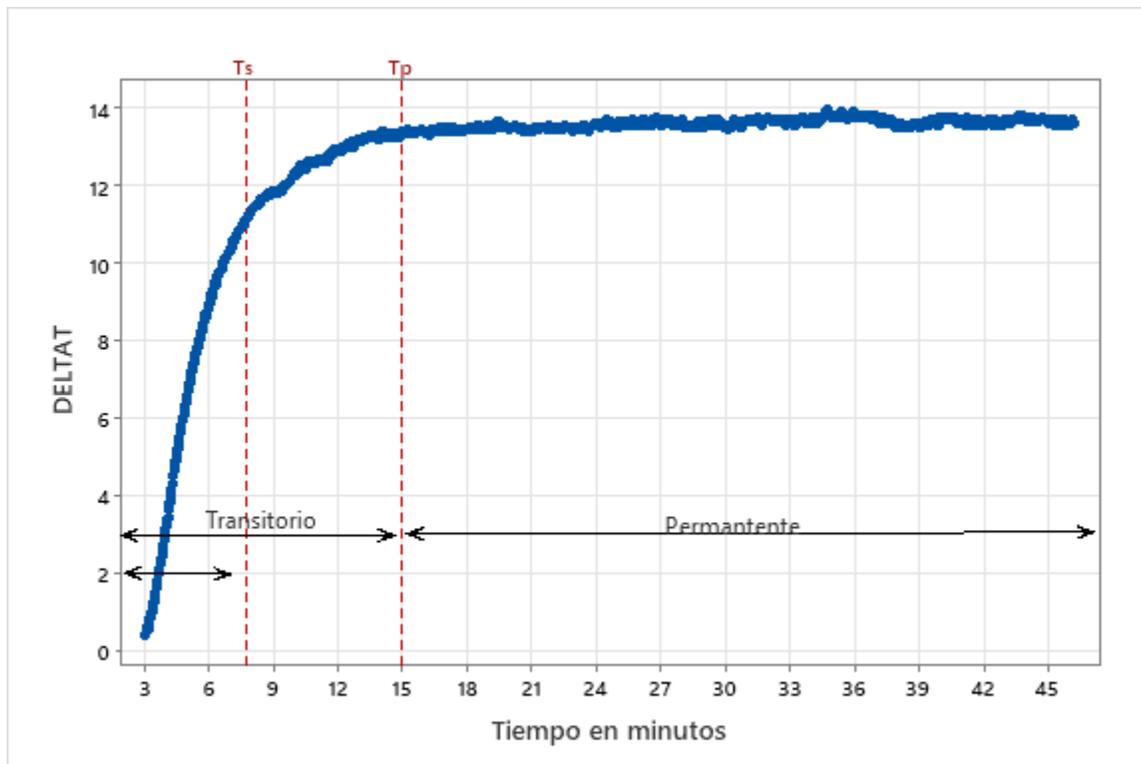
Nota. La imagen muestra, el intercambiador TPMS ubicado en el banco de pruebas a una inclinación de 45 °.

Velocidad 2.6 m/s

La serie de tiempo (Figura 87) muestra una curva ascendente de variación de temperatura (T_s) de aproximadamente 7.5 minutos y el tiempo que tarde en llegar a su estado estable (T_p) es de aproximadamente 15 minutos.

Figura 87

Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L15 a 2.6 m/s



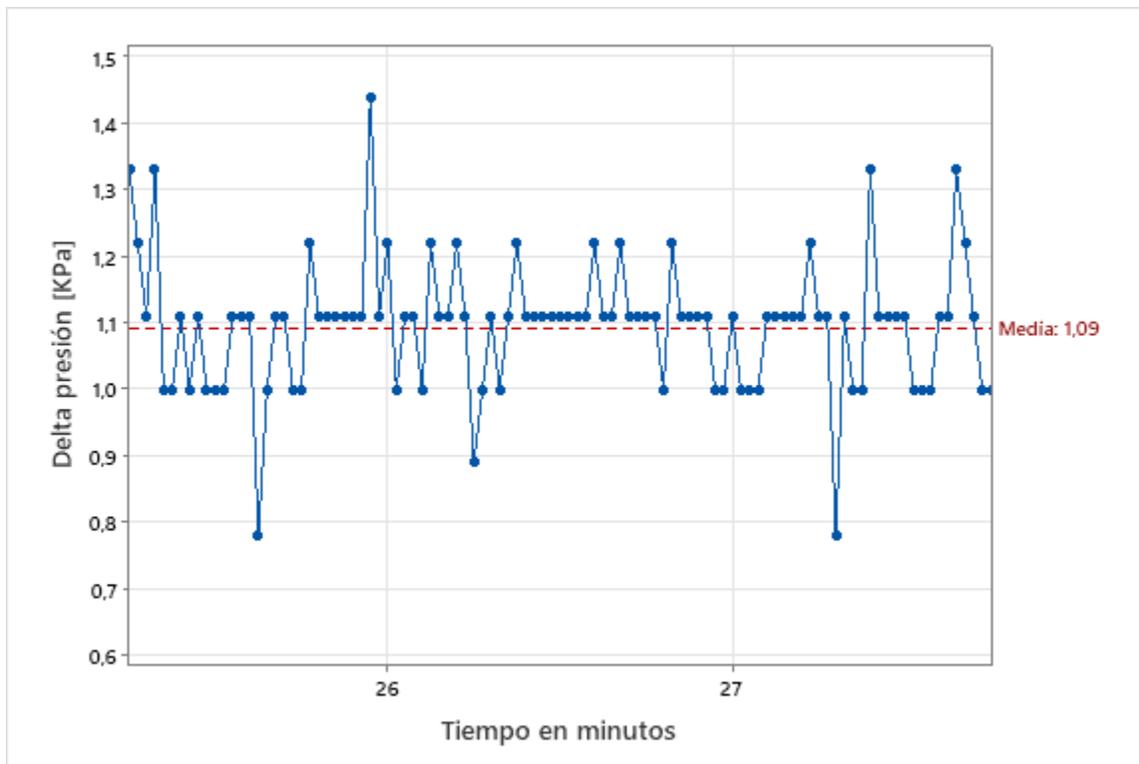
Nota. La imagen muestra la variación de la temperatura en la TPMS L15 con velocidad de aire de 2.6 m/s; con los distintos tiempos que presenta: Ts=tiempo de subida, Tp=tiempo de establecimiento. Así como también sus estados: Estado transitorio y permanente.

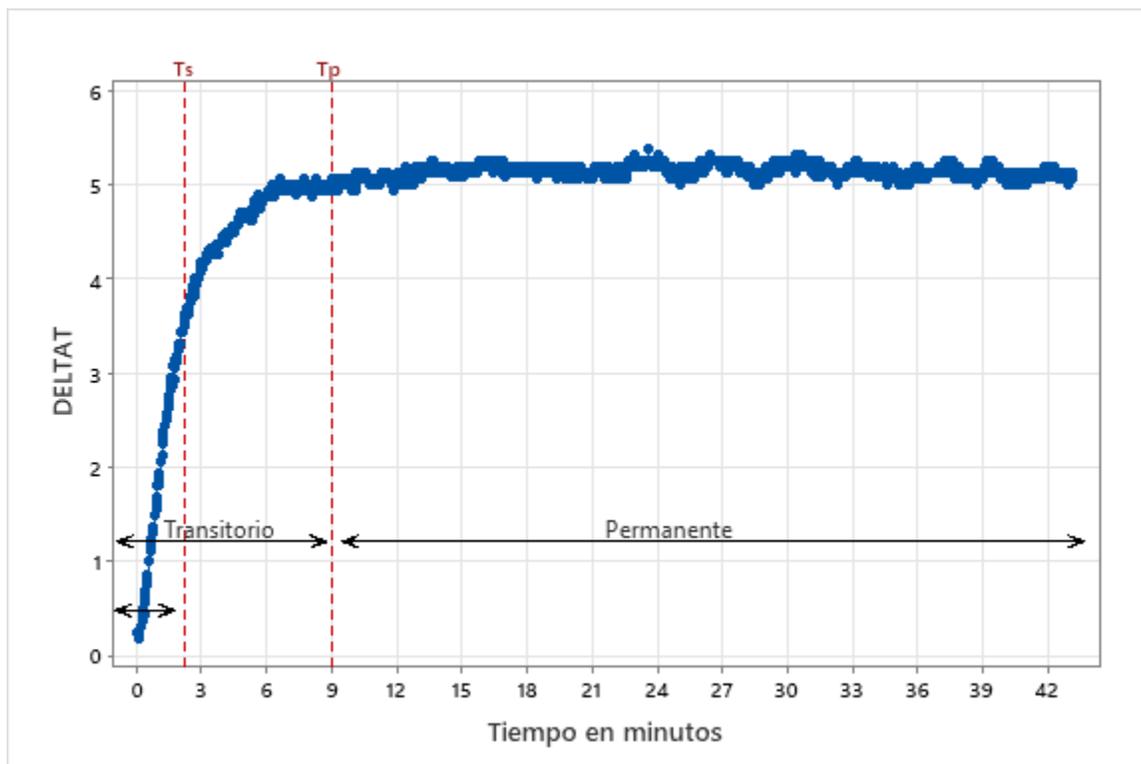
Esta TPMS presenta un pico máximo de variación de **13.94 °C**

Para la gráfica de la variación de presión mostrado en la Figura 88, se extrajo una región del estado permanente en donde el delta de temperatura es estable.

Figura 88

Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L15 a 2.6 m/s





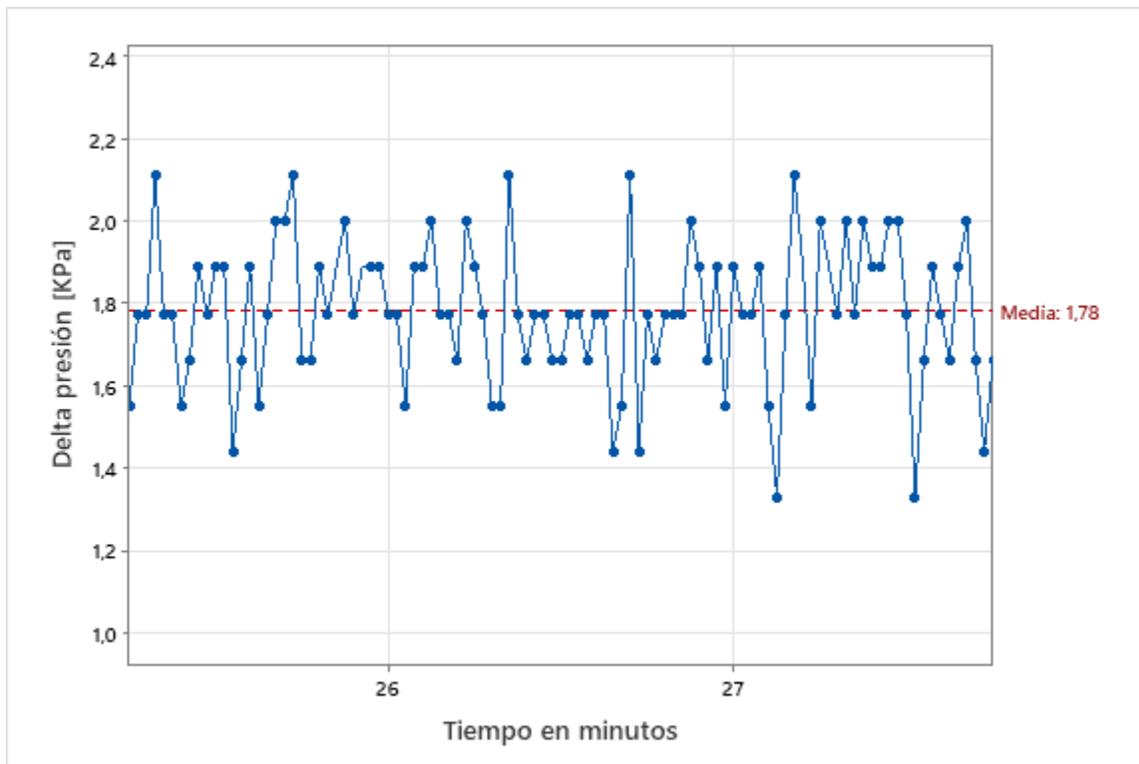
Nota. La imagen muestra la variación de la temperatura en la TPMS L15 con velocidad de aire de 6 m/s; con los distintos tiempos que presenta: T_s =tiempo de subida, T_p =tiempo de establecimiento. Así como también sus estados: Estado transitorio y permanente.

Esta TPMS presenta un pico máximo de variación de **5.38 °C**

Para la gráfica de la variación de presión mostrado en la Figura 90, se extrajo una región del estado permanente en donde el delta de temperatura es estable.

Figura 90

Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L15 a 6 m/s



Nota. La imagen muestra la variación de la presión en la TPMS L15 con velocidad de aire de 6 m/s. Tomado de una parte de la región del estado estable en el minuto 25 al 28

La variación de presión tiene una media de 1.78 KPa cuando el proceso se encuentre en la región de estado permanente

Prueba L5 Orientación 0°

La TPMS fue ubicada en el banco de pruebas tal como se ve en la Figura 91.

Figura 91

Prueba de TPMS L5 0°



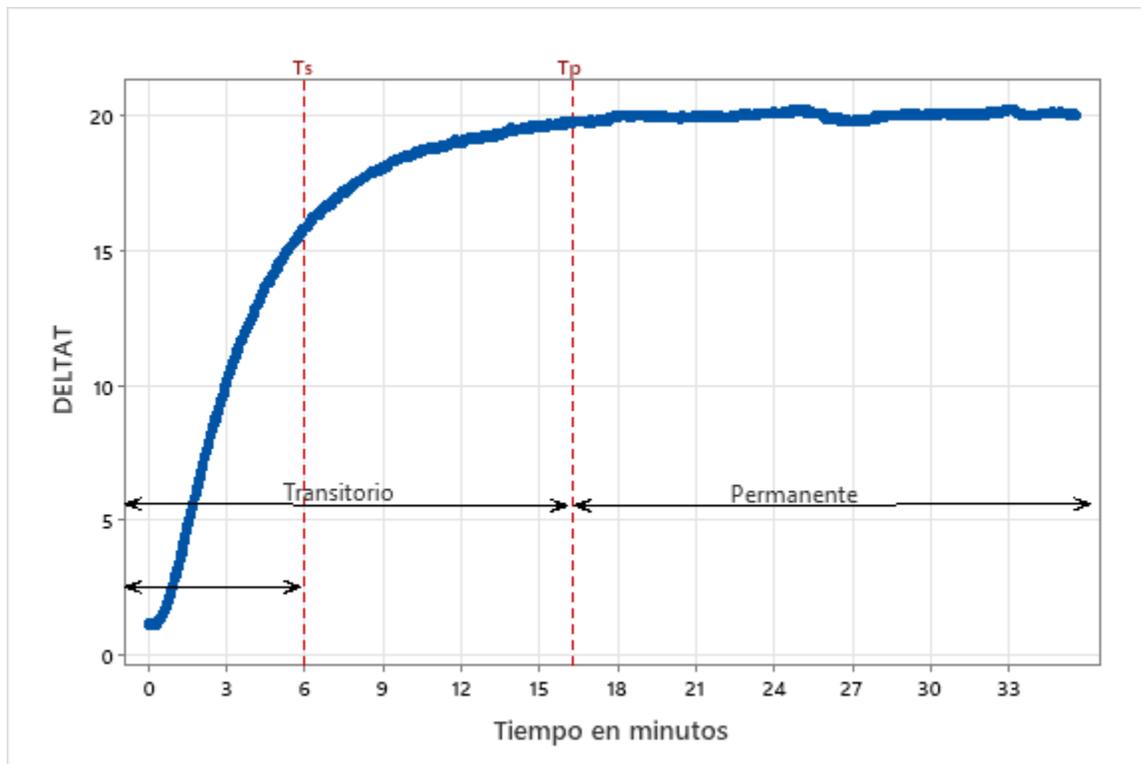
Nota. La imagen muestra, el intercambiador TPMS ubicado en el banco de pruebas a una inclinación de 0° .

Velocidad 2.6 m/s

La serie de tiempo (Figura 92) muestra una curva ascendente de variación de temperatura (T_s) de aproximadamente 6 minutos y el tiempo que tarde en llegar a su estado estable (T_p) es de aproximadamente 16.2 minutos.

Figura 92

Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L5 a 2.6 m/s



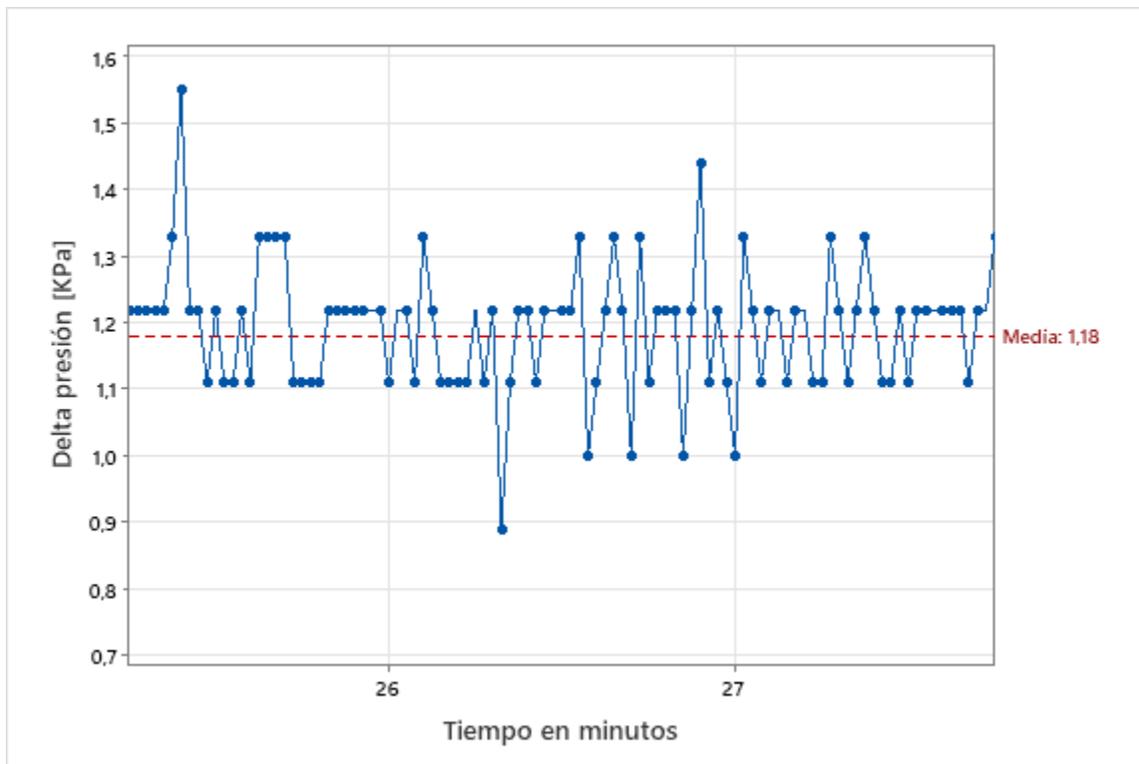
Nota. La imagen muestra la variación de la temperatura en la TPMS L5 con velocidad de aire de 2.6 m/s; con los distintos tiempos que presenta: T_s =tiempo de subida, T_p =tiempo de establecimiento. Así como también sus estados: Estado transitorio y permanente.

Esta TPMS presenta un pico máximo de variación de **20.19 °C**

Para la gráfica de la variación de presión mostrado en la Figura 93, se extrajo una región del estado permanente en donde el delta de temperatura es estable.

Figura 93

Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L5 a 2.6 m/s



Nota. La imagen muestra la variación de la presión en la TPMS L5 con velocidad de aire de 2.6 m/s. Tomado de una parte de la región del estado estable en el minuto 25 al 28

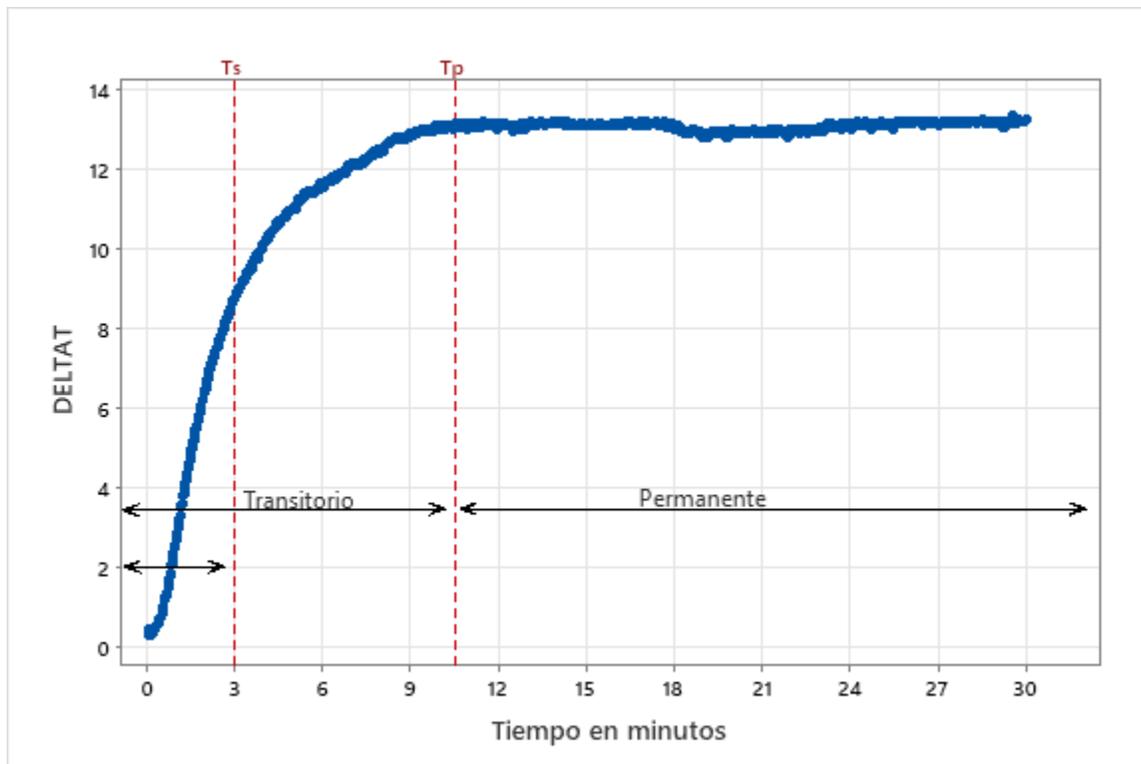
La variación de presión tiene una media de 1.18 KPa cuando el proceso se encuentre en la región de estado permanente

Velocidad 6 m/s*

La serie de tiempo (Figura 94) muestra una curva ascendente de variación de temperatura (T_s) de aproximadamente 3 minutos y el tiempo que tarde en llegar a su estado estable (T_p) es de aproximadamente 10.5 minutos.

Figura 94

Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L15 a 6 m/s



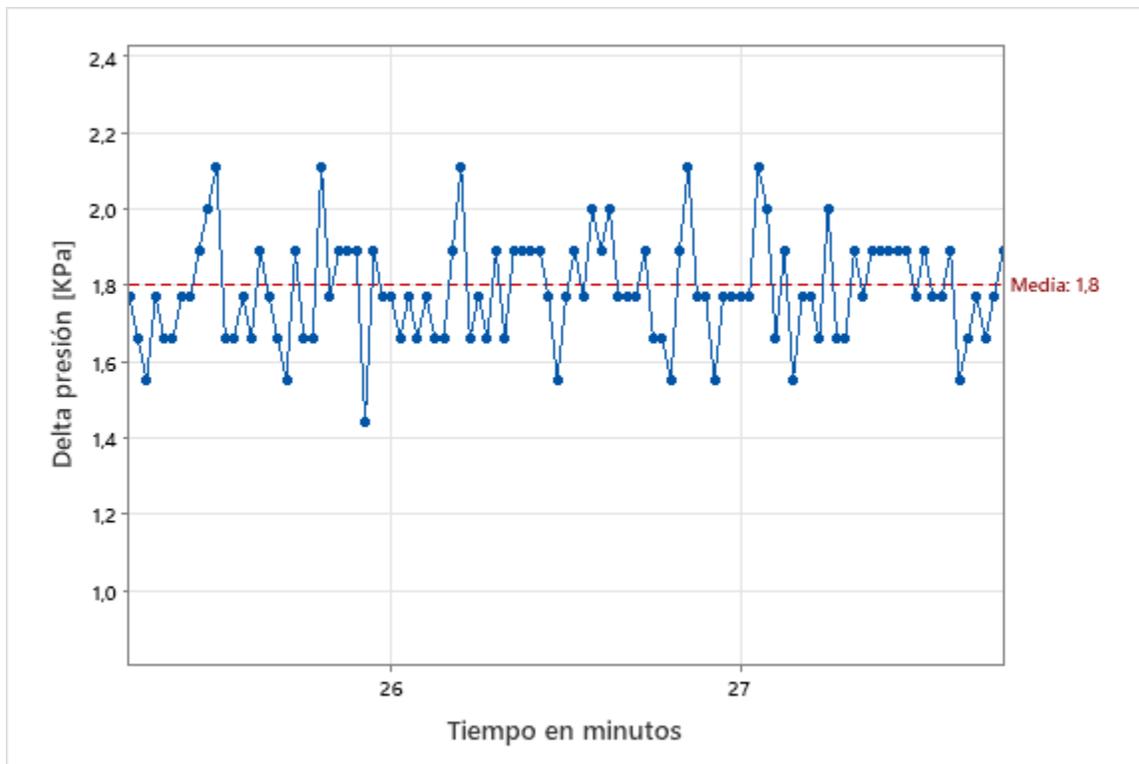
Nota. La imagen muestra la variación de la temperatura en la TPMS L5 con velocidad de aire de 6 m/s; con los distintos tiempos que presenta: T_s =tiempo de subida, T_p =tiempo de establecimiento. Así como también sus estados: Estado transitorio y permanente.

Esta TPMS presenta un pico máximo de variación de **13.32 °C**

Para la gráfica de la variación de presión mostrado en la Figura 95, se extrajo una región del estado permanente en donde el delta de temperatura es estable.

Figura 95

Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L5 a 6 m/s



Nota. La imagen muestra la variación de la presión en la TPMS L5 con velocidad de aire de 6 m/s. Tomado de una parte de la región del estado estable en el minuto 25 al 28

La variación de presión tiene una media de 1.8 KPa cuando el proceso se encuentre en la región de estado permanente

Prueba L10 Orientación 0°

La TPMS fue ubicada en el banco de pruebas tal como se ve en la Figura 96.

Figura 96

Prueba de TPMS L10 0°



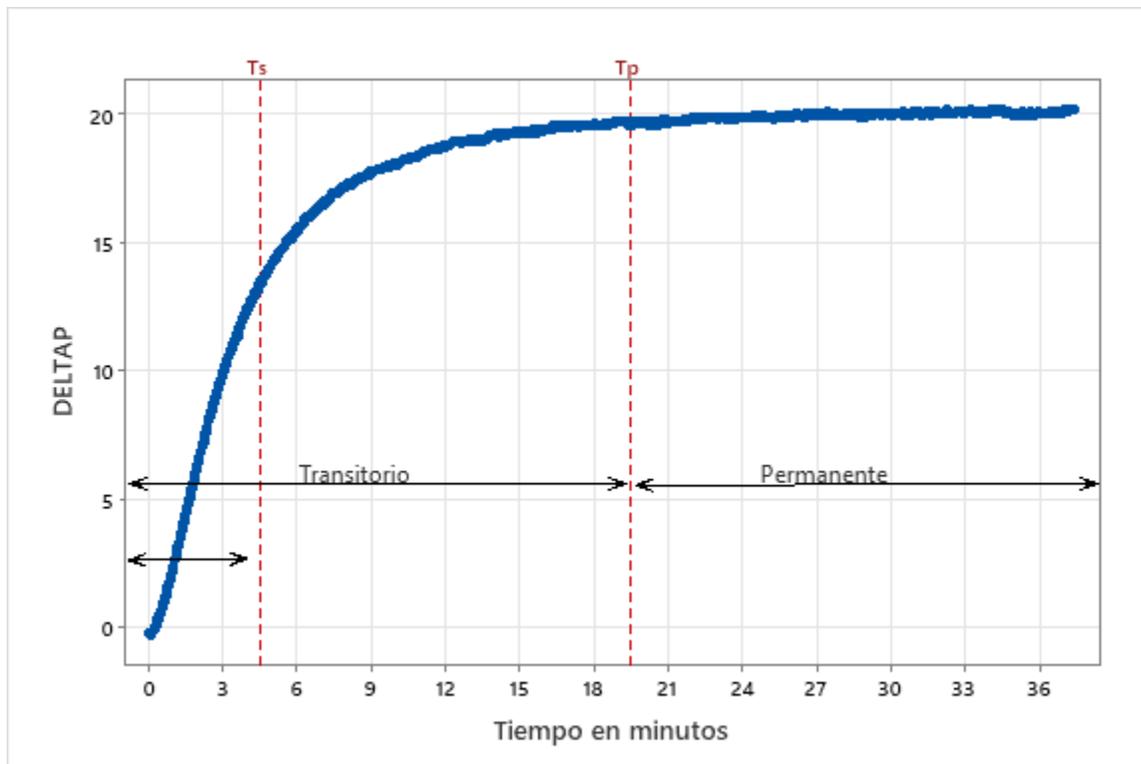
Nota. La imagen muestra, el intercambiador TPMS ubicado en el banco de pruebas a una inclinación de 0° .

Velocidad 2.6 m/s

La serie de tiempo (Figura 97) muestra una curva ascendente de variación de temperatura (T_s) de aproximadamente 4.5 minutos y el tiempo que tarde en llegar a su estado estable (T_p) es de aproximadamente 19.5 minutos.

Figura 97

Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L10 a 2.6 m/s



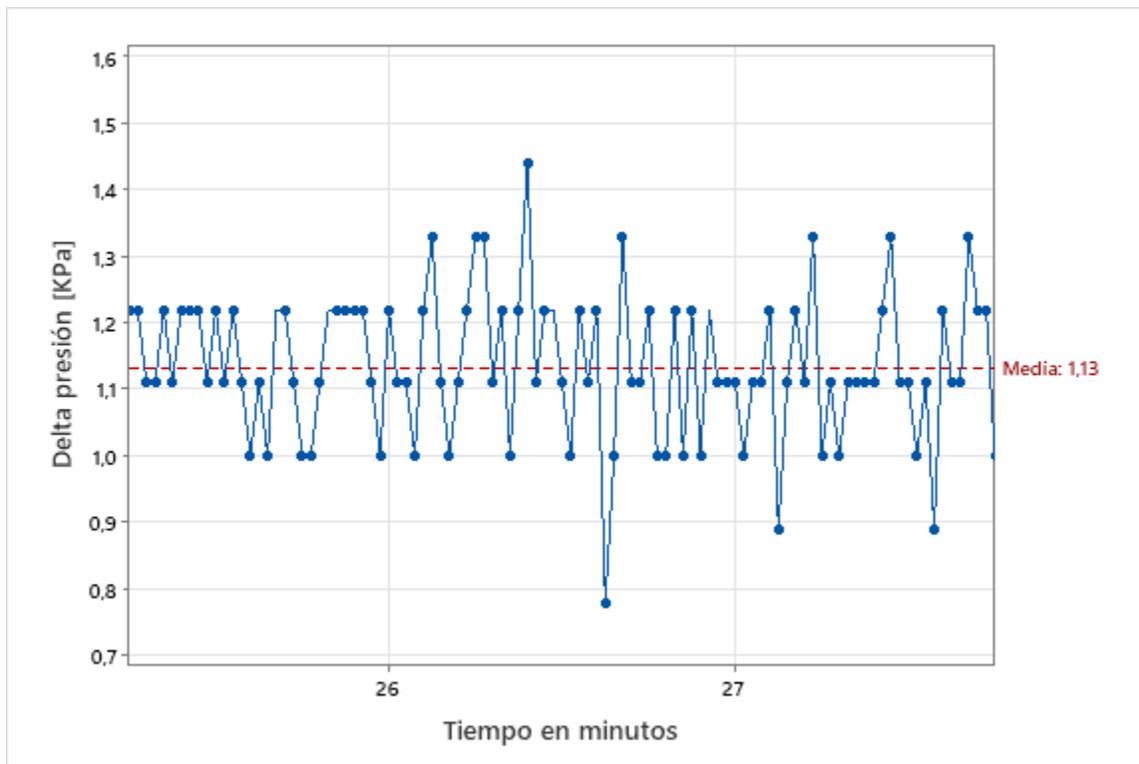
Nota. La imagen muestra la variación de la temperatura en la TPMS L10 con velocidad de aire de 2.6 m/s; con los distintos tiempos que presenta: T_s =tiempo de subida, T_p =tiempo de establecimiento. Así como también sus estados: Estado transitorio y permanente.

Esta TPMS presenta un pico máximo de variación de **20.13 °C**

Para la gráfica de la variación de presión mostrado en la Figura 98, se extrajo una región del estado permanente en donde el delta de temperatura es estable.

Figura 98

Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L10 a 2.6 m/s



Nota. La imagen muestra la variación de la presión en la TPMS L10 con velocidad de aire de 2.6 m/s. Tomado de una parte de la región del estado estable en el minuto 25 al 28

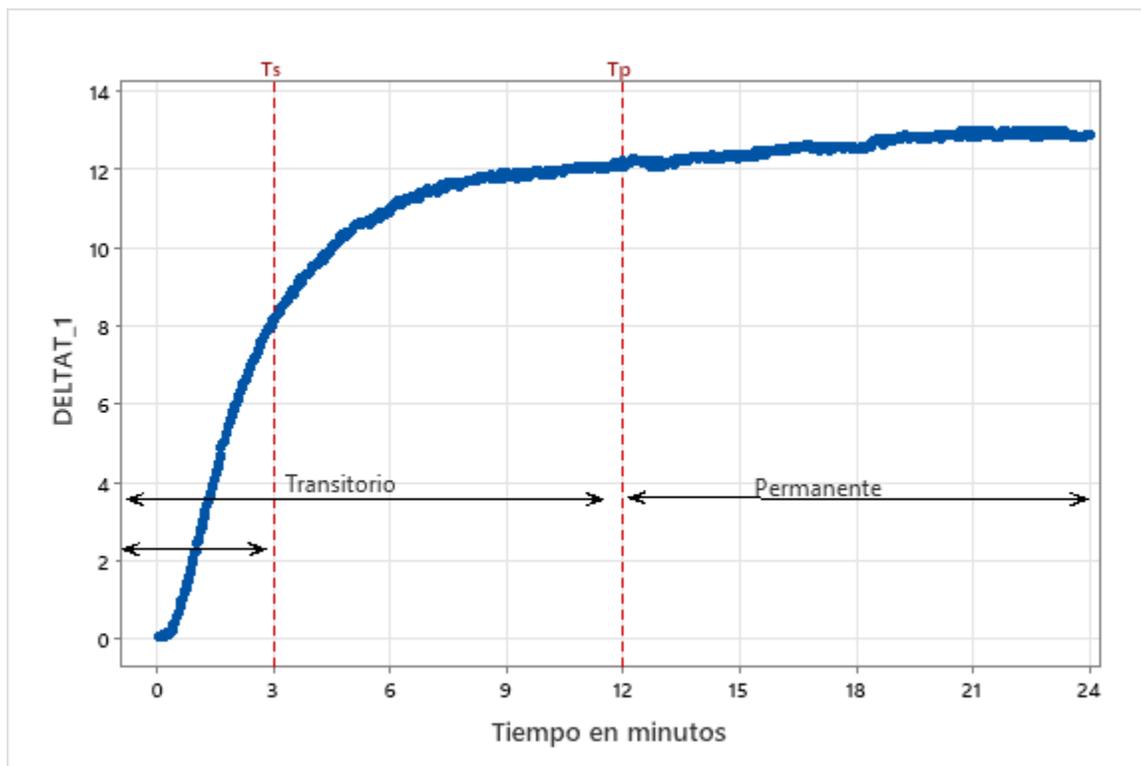
La variación de presión tiene una media de 1.13 KPa cuando el proceso se encuentre en la región de estado permanente

Velocidad 6 m/s

La serie de tiempo (Figura 99) muestra una curva ascendente de variación de temperatura (T_s) de aproximadamente 3 minutos y el tiempo que tarde en llegar a su estado estable (T_p) es de aproximadamente 12 minutos.

Figura 99

Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L10 a 6 m/s



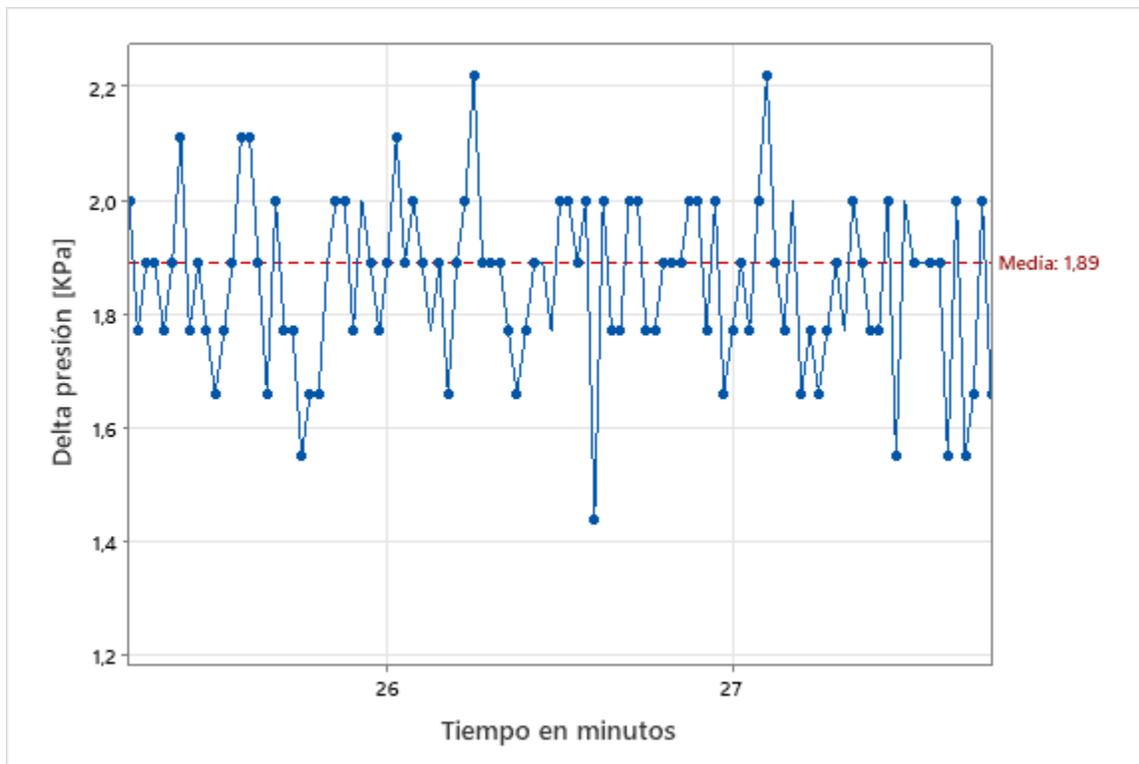
Nota. La imagen muestra la variación de la temperatura en la TPMS L10 con velocidad de aire de 6 m/s; con los distintos tiempos que presenta: T_s =tiempo de subida, T_p =tiempo de establecimiento. Así como también sus estados: Estado transitorio y permanente.

Esta TPMS presenta un pico máximo de variación de **12.94 °C**

Para la gráfica de la variación de presión mostrado en la Figura 100, se extrajo una región del estado permanente en donde el delta de temperatura es estable.

Figura 100

Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L10 a 6 m/s



Nota. La imagen muestra la variación de la presión en la TPMS L10 con velocidad de aire de 6 m/s. Tomado de una parte de la región del estado estable en el minuto 25 al 28

La variación de presión tiene una media de 1.89 KPa cuando el proceso se encuentre en la región de estado permanente

Prueba L15 Orientación 0°

La TPMS fue ubicada en el banco de pruebas tal como se ve en la Figura 101.

Figura 101

Prueba de TPMS L15 0°



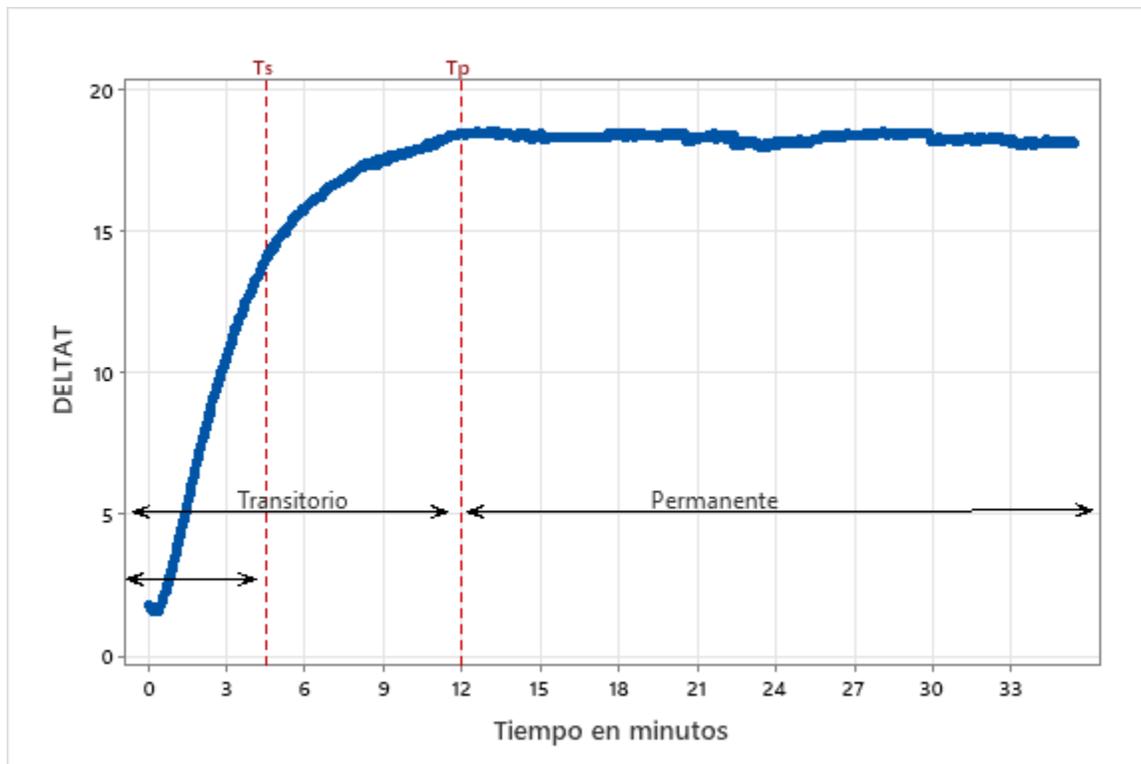
Nota. La imagen muestra, el intercambiador TPMS ubicado en el banco de pruebas a una inclinación de 45 °.

Velocidad 2.6 m/s

La serie de tiempo (Figura 102) muestra una curva ascendente de variación de temperatura (T_s) de aproximadamente 7.5 minutos y el tiempo que tarde en llegar a su estado estable (T_p) es de aproximadamente 15 minutos.

Figura 102

Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L15 a 2.6 m/s



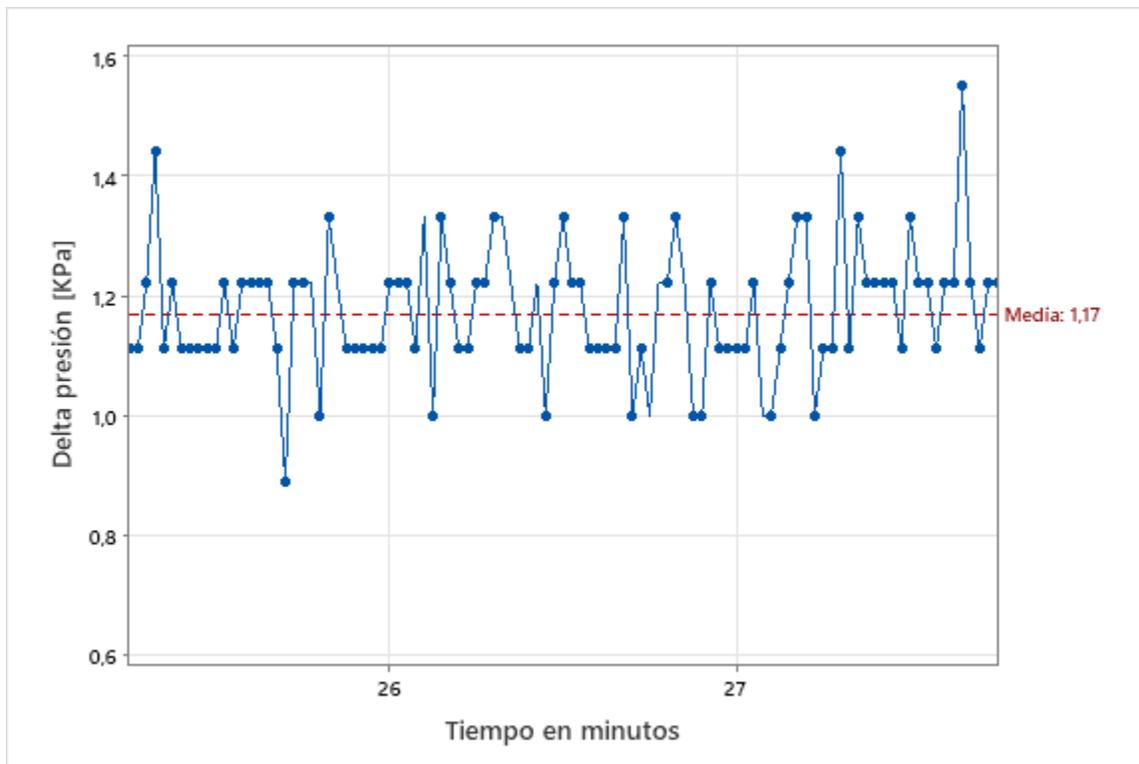
Nota. La imagen muestra la variación de la temperatura en la TPMS L15 con velocidad de aire de 2.6 m/s; con los distintos tiempos que presenta: T_s =tiempo de subida, T_p =tiempo de establecimiento. Así como también sus estados: Estado transitorio y permanente.

Esta TPMS presenta un pico máximo de variación de **18.4°C**

Para la gráfica de la variación de presión mostrado en la Figura 103, se extrajo una región del estado permanente en donde el delta de temperatura es estable.

Figura 103

Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L15 a 2.6 m/s



Nota. La imagen muestra la variación de la presión en la TPMS L15 con velocidad de aire de 2.6 m/s. Tomado de una parte de la región del estado estable en el minuto 25 al 28

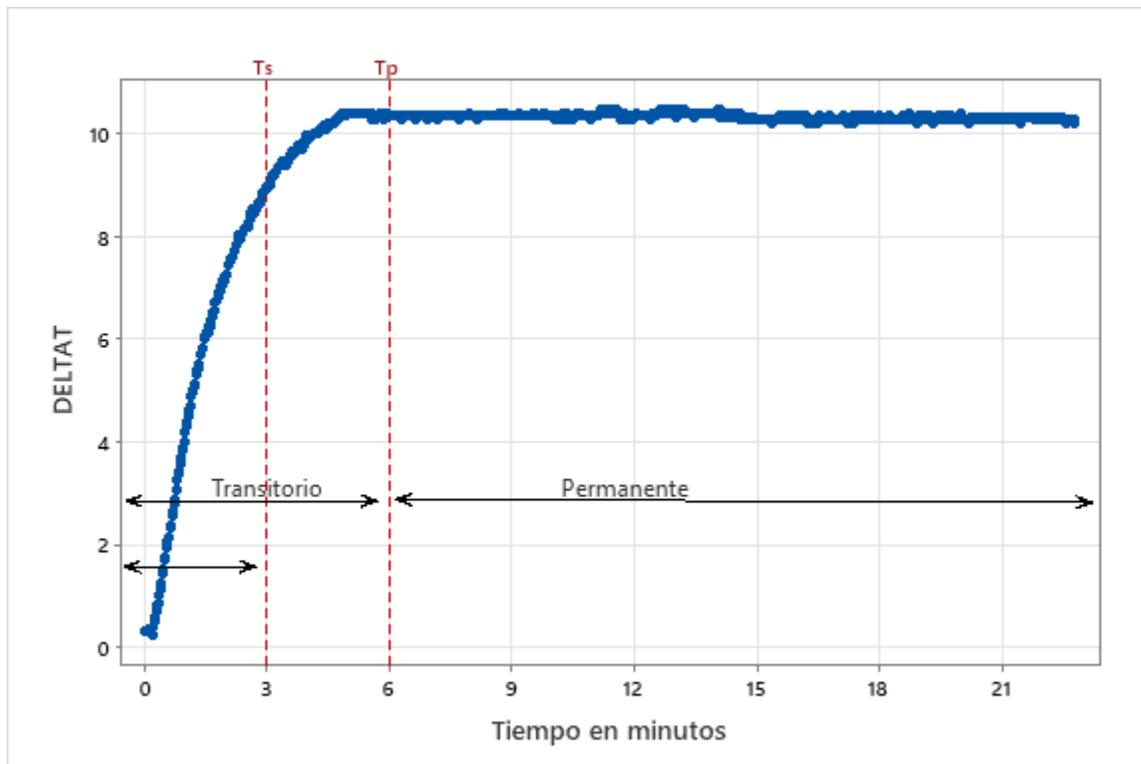
La variación de presión tiene una media de 1.17 KPa cuando el proceso se encuentre en la región de estado permanente

Velocidad 6 m/s

Se realizó una serie de tiempo, Figura 104 para verificar la evolución de la variación de temperatura. Se observa que el tiempo que tarda la TPMS en tener su curva ascendente de variación de temperatura (T_s) es de aproximadamente 3 minutos y el tiempo que tarda en llegar a su estado estable (T_p) es de aproximadamente 6 minutos.

Figura 104

Serie de tiempo de la variación de temperatura en la TPMS L15 a 6 m/s



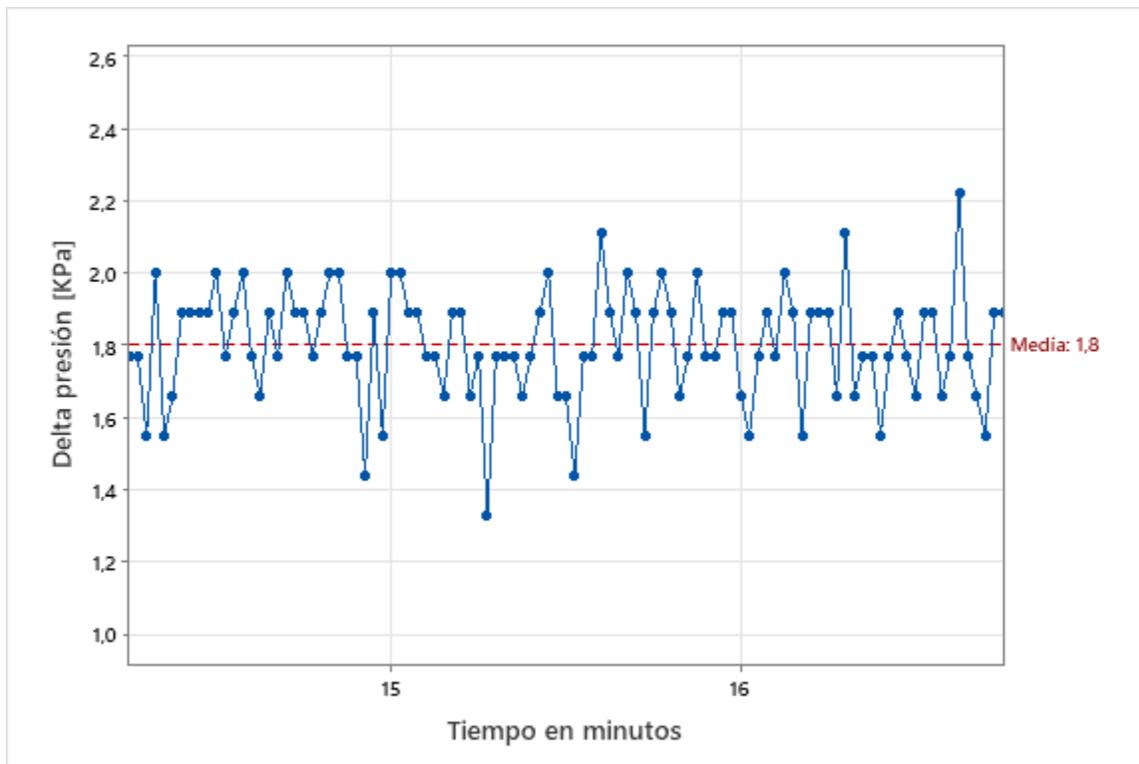
Nota. La imagen muestra la variación de la temperatura en la TPMS L15 con velocidad de aire de 6 m/s; con los distintos tiempos que presenta: T_s =tiempo de subida, T_p =tiempo de establecimiento. Así como también sus estados: Estado transitorio y permanente.

Esta TPMS presenta un pico máximo de variación de **10.32 °C**

Para la gráfica de la variación de presión mostrado en la Figura 105, se extrajo una región del estado permanente en donde el delta de temperatura es estable.

Figura 105

Serie de tiempo de la variación de presión en la TPMS L15 a 6 m/s



Nota. La imagen muestra la variación de la presión en la TPMS L15 con velocidad de aire de 2.6 m/s. Tomado de una parte de la región del estado estable en el minuto 14 al 17.

La variación de presión tiene una media de 1.8 KPa cuando el proceso se encuentre en la región de estado permanente

Resumen y Análisis General

La Tabla 23 muestra un resumen de los datos obtenidos en el banco de pruebas de todos los intercambiadores de calor usados. Se puede observar lo siguiente:

- El mejor intercambiador de calor, tanto a una velocidad 2.6 como 6 m/s resultan ser el TPMS L5 y L10, con deltas de temperatura muy cercanos entre sí. Llegando hasta un delta de 20.19 en el caso del TPMS L10 a 0° .
- La velocidad óptima para que hay un Delta de temperatura más grande es la de 2.6 m/s

- Se observa un aumento considerable de presión cuando hay un velocidad de fluido de 6m/s. Considerando esta caída de presión como un factor negativo
- Las TPMS al no estar con sus orificios en dirección lineal y paralelamente al flujo del aire (inclinación de 0°), tiene un aumento significativo en el delta de temperatura y un aumento muy poco significativo en el delta de presión
- Aunque el tiempo de subida (Ts) y el tiempo de establecimiento (Tp), estén condicionados por los factores ambientales, se puede observar que, a mayor velocidad de fluido, hay más rapidez de establecimiento
- Las TPMS en estas pruebas, superaron al intercambiador de calor comercial

Tabla 23

Comparación de todos los experimentos de prueba

Velocidad	Tipo	Ts [min]	Tp [min]	Delta temperatura [°C]	Delta Presión [KPa]
2.6 m/s	Comercial	3	12	12.1	1.05
	L5 45°	4	17	17	1.11
	L10 45°	4	15	17.38	1.09
	L15 45°	7.5	15	13.94	1.09
	L5 0°	6	16.2	20.19	1.18
	L10 0°	4.5	19.5	20.13	1.13
	L15 0°	7.5	15	18.4	1.17
6 m/s	Comercial	2	9	8.93	1.74
	L5 45°	2.5	9	9.56	1.76
	L10 45°	3	15	10.25	1.84
	L15 45°	2	9	5.38	1.78
	L5 0°	3	10.5	13.32	1.8
	L10 0°	3	12	12.94	1.89
	L15 0°	3	6	10.32	1.8

Nota. La tabla muestra la comparación resumida entre todas las pruebas realizadas a los intercambiadores de calor.

Conclusiones

Se logró identificar el parámetro crítico del proceso que fue la temperatura y su actividad durante el quemado del cubilete y la fundición. Para este proceso se usó el termopar tipo K que cumplió satisfactoriamente con el monitoreo en los 2 procesos mencionados. Sin embargo, aunque el termopar registró hasta el último dato de temperatura en el enfriamiento, este dejó de funcionar luego de la extracción de la TPMS, puesto que el cable que atravesaba el cubilete se carbonizó por la temperatura.

El encapsulado que se diseñó para cubrir del polvo y residuos ambientales, protegió al circuito que correspondía a la ESP32, y a los módulos MAX6675 de los termopares tipo K correctamente. Y no se registró ningún fallo relacionado con esto.

Los módulos MAX6675 que se encargaron de acondicionar la señal analógica de los termopares tipo K, funcionaron correctamente y permitieron que la señal analógica registrada por la ESP32 no registraré ningún valor incoherente.

La plataforma usada para el monitoreo in situ, Firebase; cumplió correctamente con los estándares que se le impusieron, logrando registrar los datos de temperatura y humedad en tiempo real y a la frecuencia de muestreo impuesta en la ESP32. Esta plataforma resultó muy versátil gracias a la tecnología de Google, ya que permite conectarse con varias aplicaciones propias de la empresa.

Las cartas de control X-R resultan ser herramientas muy eficaces para el control estadístico, ya que vislumbra otra perspectiva de los datos encontrados y permite visualizar de forma correcta la evolución del proceso en varias muestras de datos. Y como este puede verse afectado por parámetros de externos inherentes al proceso.

El monitoreo de procesos como este a nivel industrial y empresarial abre una puerta al futuro del análisis de datos en la industria 4.0 y el big data. En donde la recolección de datos

con principios de mejora en la calidad está siendo y será una de las nuevas tendencias tecnológicas del mañana. Ya que el conocimiento registrado abre el camino a la automatización en donde la mano humana quedará obsoleta por el aprendizaje de las máquinas.

Recomendaciones

Aunque en el desarrollo de esta investigación practica se usó como Dashboard, a la hoja de cálculo de Google. Google ofrece múltiples herramientas como Looker studio que fue diseñado específicamente para realizar análisis de datos y tener graficas de control. No se usó en esta práctica puesto que, al tener más de 5000 datos en cada gráfica, la plataforma colapsaba y se hacía lenta.

Se recomienda también, hacer uso del hosting gratuito que proporciona Firebase como alojamiento de una página web para registro instantáneo de datos en diferentes aplicaciones.

Para fundiciones parecidas en donde el cable del termopar este comprometido en el cubilete, se recomienda el uso de lana de roca y cinta aislante para que el cable no se carbonice y el sensor no se pierda.

Bibliografía

- Andrade Villacis, B. L. (2022). *Estudio de transferencia de calor en estructuras celulares TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) fabricadas mediante estereolitografía*. ESPE.
- AnishInTech (Director). (2022, noviembre 22). *Export data from Firebase database To Google Sheets* || 2022. <https://www.youtube.com/watch?v=dOwZ5gzl9wI>
- Ashby, M. F., & Cebon, D. (1993). Materials selection in mechanical design. *Le Journal de Physique IV, 03(C7)*, C7-1-C7-9. <https://doi.org/10.1051/jp4:1993701>
- Attarzadeh, R., Rovira, M., & Duwig, C. (2021). Design analysis of the “Schwartz D” based heat exchanger: A numerical study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 177, 121415. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121415>
- BBVA. (2019, noviembre 8). Te contamos qué es el «machine learning» y cómo funciona. *BBVA NOTICIAS*. <https://www.bbva.com/es/machine-learning-que-es-y-como-funciona/>
- Bergman, T. L., & Incropera, F. P. (Eds.). (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer* (7th ed). Wiley.
- Big Data: ¿En qué consiste? Su importancia, desafíos y gobernabilidad*. (s. f.). Recuperado 17 de enero de 2023, de <https://www.powerdata.es/big-data>
- Cadenas, M. (s. f.). *CARTAS DE CONTROL*. <https://ingenieriaindustrialupvmtareasytrabajos.files.wordpress.com/2012/08/cartas-de-control-por-variables.pdf>
- Calculadora del tamaño de muestra*. (s. f.). SurveyMonkey. Recuperado 25 de enero de 2023, de <https://es.surveymonkey.com/mp/sample-size-calculator/>

Certus Investment Powder Technologies Co., Ltd., established in Istanbul. (s. f.). Certus.

Recuperado 6 de enero de 2023, de <http://certus-int.com/>

Cómo funciona un termopar. (s. f.). Blog de WIKA. Recuperado 9 de enero de 2023, de

<https://www.bloginstrumentacion.com/productos/temperatura/cmo-funciona-termopar/>

Cómo utilizar el DHT11 para medir la temperatura y humedad con Arduino. (2017, marzo 21).

<https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/sensor-dht11-temperatura-humedad-arduino/>

CVC. (1992). *CVC. Congreso de Sevilla. La lengua española y las nuevas tecnologías.*

https://cvc.cervantes.es/obref/congresos/sevilla/tecnologias/mesaredon_casacuberta.htm

Díaz, M. (s. f.). *Evolución y tendencias de los sistemas informáticos, y relevancia del proveedor tecnológico.*

<https://www.farmaindustrial.com/require/archivos/articulos/descarga/YI2R3rFUbYNG8om74ATmd7faF.pdf>

Europe, X. (2022, mayo 12). *Impresión 3D por estereolitografía (SLA): Visión general de la tecnología.* Xometry Europe. <https://xometry.eu/es/impresion-3d-por-estereolitografia-sla/>

Filali, S. (2014). *Aplicación de la guía GEDIS a los Sistemas SCADA del NAP (Network Access Point) de Canarias.*

[https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/657/Evaluacion+de+estandares+HMI+Aplicacion+de+la+guia+GEDIS+a+los+Sistemas+SCADA+del+NAP+\(Network+Access+Point\)+de+Canarias..pdf?sequence=1](https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/657/Evaluacion+de+estandares+HMI+Aplicacion+de+la+guia+GEDIS+a+los+Sistemas+SCADA+del+NAP+(Network+Access+Point)+de+Canarias..pdf?sequence=1)

¿Firebase cuesta dinero? (2021, enero 13). <https://blog.back4app.com/es/firebase-cuesta-dinero/>

Form 3+: Una impresora 3D SLA de sobremesa de calidad industrial. (s. f.). Formlabs.

Recuperado 6 de enero de 2023, de <https://formlabs.com/latam/3d-printers/form-3/>

- Fuente de alimentación para protoboard 5V 3.3V MB-102—Arduino / PIC. (s. f.). *Tecnopura*. Recuperado 10 de enero de 2023, de <https://www.tecnopura.com/producto/fuente-de-alimentacion-para-protoboard-5v-3-3v-arduino-pic/>
- Garvin, D. (1998). *Competir en las ocho dimensiones de la calidad*.
- Han, L., & Che, S. (2018). An Overview of Materials with Triply Periodic Minimal Surfaces and Related Geometry: From Biological Structures to Self-Assembled Systems. *Advanced Materials*, 30(17), 1705708. <https://doi.org/10.1002/adma.201705708>
- Hashmi, S., Batalha, G. F., Van Tyne, C. J., & Yilbas, B. S. (Eds.). (2014). *Comprehensive Materials Processing*. Elsevier.
- Impresoras 3D SLA y SLS de alta resolución para profesionales*. (s. f.). Formlabs. Recuperado 6 de enero de 2023, de <https://formlabs.com/latam/>
- Kim, J., & Yoo, D.-J. (2020). 3D printed compact heat exchangers with mathematically defined core structures. *Journal of Computational Design and Engineering*, 7(4), 527-550. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa032>
- Krueger, M. W. (1991). *Artificial reality II*. Addison-Wesley.
- Materiales*. (s. f.). Recuperado 6 de enero de 2023, de <https://formlabs.com/es/store/materials/>
- Mell, peter, & Grance, T. (2011). *The NIST Definition of Cloud Computing*. NIST. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>
- Mischianti, R. (2021, febrero 17). *DOIT ESP32 DEV KIT v1 high resolution pinout and specs*. Renzo Mischianti. <https://www.mischianti.org/2021/02/17/doit-esp32-dev-kit-v1-high-resolution-pinout-and-specs/>
- Montgomery, D. C. (2013). *Introduction to statistical quality control* (7th ed). Wiley.

- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2016). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería* (Segunda edición). Limusa.
- Moroney, L. (2017). The Firebase Realtime Database. En L. Moroney, *The Definitive Guide to Firebase* (pp. 51-71). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2943-9_3
- Mustafa, A. M. (2002). *Control de calidad: Cartas de control por variables*.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Pagac, M., Hajnys, J., Ma, Q.-P., Jancar, L., Jansa, J., Stefek, P., & Mesicek, J. (2021). A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing. *Polymers*, 13(4), 598. <https://doi.org/10.3390/polym13040598>
- Pereira Passos, A. G. (2019). *Laminar flow and heat transfer in triply periodic minimal surfaces*. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2019.04.001>
[Técnico Lisboa](https://doi.org/10.1016/j.taml.2019.04.001)
- Possehl. (s. f.). Fundición—Colado de precisión. *Possehl*.
- Prasad, R. (2012). Progress in Investment Castings. En M. Srinivasan (Ed.), *Science and Technology of Casting Processes*. InTech. <https://doi.org/10.5772/50550>
- ¿Qué es Excel, para qué sirve y cómo funciona? - ExcelParaTodos. (s. f.). Recuperado 10 de enero de 2023, de <https://excelparatodos.com/que-es-excel/>
- Qué es Firebase: Funcionalidades, ventajas y conclusiones. (2020, mayo 17). *DIGITAL55*. <https://digital55.com/blog/que-es-firebase-funcionalidades-ventajas-conclusiones/>
- ¿Qué es Google Apps Script y para qué sirve? (s. f.). Recuperado 10 de enero de 2023, de <https://www.beservices.es/google-apps-script-que-es-n-5412-es>

- ¿Qué es IoT? - Guía del Internet de las cosas para principiantes - AWS. (s. f.). Amazon Web Services, Inc. Recuperado 17 de enero de 2023, de <https://aws.amazon.com/es/what-is/iot/>
- REDACCIÓN. (2020, abril 3). 10 pasos para crear una HMI de alto rendimiento. *Tecnología para la Industria*. <https://tecnologiaparalaindustria.com/10-pasos-para-crear-una-hmi-de-alto-rendimiento/>
- Sánchez, E. (2012). *Diseño de un sistema de control domótico basado en la plataforma Arduino*. Universitat Politècnica de València.
- Sensor de temperatura y humedad relativa DHT11. (s. f.). Naylamp Mechatronics - Perú. Recuperado 9 de enero de 2023, de <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/57-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht11.html>
- Sopcak, J. E. (1986). *Handbook of lost wax or investment casting: A how-to-do manual that shows you how to make the equipment you will need as well as how to use it to make patterns, molds and castings for jewelry and small metal parts*. Gem Guides Book Co.
- Termopar: Tipos y Aplicaciones. (s. f.). Recuperado 9 de enero de 2023, de <https://mx.omega.com/prodinfo/termopar.html>
- Transmisor MAX6675 para Termocupla K. (s. f.). Naylamp Mechatronics - Perú. Recuperado 9 de enero de 2023, de <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/331-transmisor-max6675-para-termocupla-k.html>
- Trujillo Freire, I. (2023). *Establecimiento de los dominios físicos a partir de estructuras TPMS matemáticamente definidas para obtener intercambiadores de calor compactos reconfigurables*. ESPE.

Utela, B., Storti, D., Anderson, R., & Ganter, M. (2008). A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP). *Journal of Manufacturing Processes*, 10(2), 96-104. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2009.03.002>

Veintimilla, F. (2023). *Fundicion de estructuras TPMS por cera perdida*. ESPE.

Walker, J., Harris, E., Lynagh, C., Beck, A., Lonardo, R., Vuksanovich, B., Thiel, J., Rogers, K., Conner, B., & MacDonald, E. (2018). 3D Printed Smart Molds for Sand Casting. *International Journal of Metalcasting*, 12(4), 785-796. <https://doi.org/10.1007/s40962-018-0211-x>

Ways LFS 3D Printing Produces Better Parts. (s. f.). Recuperado 6 de enero de 2023, de <https://formlabs.com/blog/benefits-of-lfs-3d-printing/>

Workshop, D. (2022, marzo 20). *ESP32 WiFiManager—Easy WiFi Provisioning*. DroneBot Workshop. <https://dronebotworkshop.com/wifimanager/>

Apéndices