UNIVERSIDAD PRIVADA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Desarrollo de un controlador de temperatura para un molde de inyección con
sistema de canal caliente empleando lógica difusa

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR(ES)

Quispe Balcázar, Ricardo Erick (0000-0001-8475-9812)

Saravia Jurado, Carlos Alain (0000-0003-1364-3892)

ASESOR

Márquez Marrou, Manuel Ángel (0000-0003-4380-1054)

Lima, [29 de marzo de 2020]

DEDICATORIA

A nuestros padres y profesores, quienes gracias a sus enseñanzas hicieron esto posible.

RESUMEN

La tesis propone la reducción de costos de los controladores del proceso de inyección de plástico en el sector PYME de la industria peruana, orientada a empresas que utilizan moldes de inyección con sistema de canal caliente, mediante la regulación de temperatura del sistema en mención. Con esto se plantea resolver la necesidad que tiene este sector industrial por aumentar su competitividad, disminuyendo el costo de su sistema de inyección, y manteniendo o mejorando la eficiencia del proceso de inyección. En consecuencia, la tesis presentada desarrolla; sobre el sistema de canal caliente, un prototipo de sistema de control de temperatura que emplea lógica difusa y a bajo costo. La validación de este proyecto se realiza en la planta de inyección plástica de la empresa Q'UMIR PLAST S.A.C., donde se realizó un cuadro comparativo que presenta las variables del proceso de inyección y de los productos plásticos obtenidos haciendo uso del controlador desarrollado versus el controlador de uso general con el que cuentan actualmente, obteniendo como resultado una correcta operación de los sistemas involucrados, el cumplimiento de los objetivos específicos de desarrollo del proyecto y la conformidad por parte del cliente.

Palabras clave: Molde con sistema de canal caliente; sistema embebido; control difuso; sistema de inyección; diseño electrónico.

Development of a temperature controller for an injection mold with a hot runner system
using fuzzy logic

ABSTRACT

The present work proposes the cost reduction of the plastic injection process controllers in the PYME sector of the Peruvian industry, it is aimed at companies that use injection molds with a hot runner system by regulating the temperature of the system in question. This raises the need for this industrial sector to increase its competitiveness, reducing the cost of its injection system, and maintaining or improving the efficiency of the injection process. Consequently, the thesis presented develops; on the hot runner system, a prototype temperature control system that uses fuzzy logic and low cost. The validation of this project is carried out in the plastic injection plant of the company Q'UMIR PLAST SAC, where a comparative table was carried out that presents the variables of the injection process and the plastic products obtained using the developed controller versus the general-purpose controller that they currently have, obtaining as a result a correct operation of the systems involved, compliance with specific project development objectives and customer compliance.

Keywords: Mold with hot runner system; embedded system; diffuse control; injection system; electronic design.

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCION.....	1
1. CAPÍTULO 1: ASPECTOS INTRODUCTORIOS	3
1.1. Situación Problemática y Definición del Problema	3
1.1.1. Situación Problemática	3
1.1.2. Definición del Problema	13
1.2. Estado del Arte.....	15
1.2.1. Productos y soluciones comerciales existentes	15
1.2.2. Propiedad intelectual registrada	17
1.2.3. Aportes de Innovación.....	19
1.2.4. Publicaciones Científicas/Académicas/Ingenieriles	20
1.2.5. Aportes de conocimiento nuevo, procedimientos, métodos y/o aplicaciones	24
1.3. Justificación	24
1.3.1. Justificación respecto a beneficios para el usuario, cliente o patrocinador del proyecto.....	24
1.3.2. Justificación Ingenieril	25
1.3.3. Justificación Económica	26
1.4. Requerimientos técnicos, ingenieriles y operativos.....	27
1.5. Objetivo General.....	28
1.6. Objetivos Específicos de Desarrollo de la Solución Propuesta	28
1.7. Breve descripción de la solución propuesta.....	29
1.7.1. Diagrama de Bloques.....	29
1.7.2. Funcionamiento	29
1.7.3. Ilustración del Producto Final	31
1.7.4. Alcances y limitaciones de la solución propuesta	31
1.7.5. Aplicaciones directas e Indirectas de la solución propuesta.....	32
1.8. Viabilidad.....	33

1.8.1.	Viabilidad técnica.....	33
1.8.2.	Viabilidad económica.....	35
1.8.3.	Viabilidad social.....	37
1.8.4.	Viabilidad operativa.....	37
1.8.5.	Alternativas.....	38
2.	CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	39
	INTRODUCCIÓN.....	39
2.1.	Micro-computador de placa única (SBC).....	39
	Linux Embebido.....	39
	Acceso a un SBC.....	39
	Interfaces de Entrada y Salida.....	39
	Unidades programables de tiempo real (PRUs).....	40
2.2.	El ADC Sigma-Delta (Conversor Análogo Digital Sigma-Delta).....	42
2.3.	Filtro Pasa-bajas de Primer Grado.....	44
2.4.	Control Difuso.....	44
	Normalización y De-normalización.....	45
	Fusificación.....	46
	Procesamiento o razonamiento.....	46
	De-fusificación.....	47
2.5.	El sensor de temperatura: La Termocupla.....	47
2.6.	Control de intensidad por ángulo de disparo.....	49
2.6.1.	TRIAC.....	50
2.7.	Protección y aislamiento de circuitos.....	52
2.7.1.	Opto-acopladores.....	52
2.7.2.	Disipadores de calor.....	52
2.8.	Resistencia calefactora.....	53
2.9.	HMI.....	54

3.	CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE PROPUESTO	55
3.1.	Introducción	55
3.2.	Materiales y componentes	57
3.2.1.	BeagleBone Black	57
3.2.2.	ADS1220	64
3.2.3.	MOC3021	67
3.2.4.	TRIAC BTA316X	67
3.2.5.	Resistencias térmicas	69
3.2.6.	Termocupla tipo J	69
3.2.7.	Panel HMI Nextion 10” capacitiva.....	69
3.3.	Diseño e implementación	70
3.3.1.	Diseño e implementación del HMI.....	70
3.3.2.	Implementación en el SBC BeagleBone Black	71
3.3.3.	Diseño e implementación de la etapa de potencia	72
3.3.4.	Uso del sensor termopar	77
3.3.5.	Diseño e implementación de la etapa de acondicionamiento de señal analógica.....	77
3.3.6.	Diseño e implementación de la etapa de digitalización (ADC).....	81
4.	CAPÍTULO 4: DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE PROPUESTO.....	85
4.1.	Introducción	85
4.2.	Diseño e implementación.....	85
	Host de Linux	86
	PRU.....	105
	HMI.....	107
5.	CAPÍTULO 5: PRUEBAS DE VALIDACIÓN Y RESULTADOS.....	110
5.1.	Validación de interfaz de potencia.....	110
5.1.1.	Variables o parámetros a medir	110

5.1.2.	Lugar y fecha de la prueba	110
5.1.3.	Equipamiento y materiales utilizados.....	110
5.1.4.	Procedimiento de medición	110
5.1.5.	Resultados en tablas y/o figuras.	111
5.1.6.	Comentarios y conclusiones de la etapa	112
5.2.	Validación de control de temperatura de las resistencias térmicas del molde con sistema de canal caliente.....	113
5.2.1.	Variables o parámetros a medir	113
5.2.2.	Lugar y fecha de la prueba	113
5.2.3.	Equipamiento y materiales utilizados.....	113
5.2.4.	Procedimiento de medición	114
5.2.5.	Resultados en tablas y/o figuras	115
5.2.6.	Comentarios y Conclusiones de la etapa	116
5.3.	Validación de envío de información a interfaz HMI (local).....	117
5.3.1.	Variables o parámetros a medir	117
5.3.2.	Lugar y fecha de la prueba	118
5.3.3.	Equipamiento y materiales utilizados.....	118
5.3.4.	Procedimiento de medición	118
5.3.5.	Resultados en tablas y/o figuras	119
5.3.6.	Comentarios y Conclusiones de la etapa	120
5.4.	Pruebas de validación y resultados del controlador desarrollado.	121
5.4.1.	Lugar y fecha de la prueba	121
5.4.2.	Equipamiento y materiales	121
5.4.3.	Variable(s), parámetro(s) o medición a validar	121
5.4.4.	Medición o prueba de referencia (Gold Standar)	121
5.4.5.	Prueba de validación adicional (Escenario de dificultad)	123
5.4.6.	Resultados.....	124

CONCLUSIONES.....	128
RECOMENDACIONES PARA TRABAJO FUTUROS	129
6. REFERENCIAS.....	130
7. APÉNDICES.....	133
Configuración de Capas del BeagleBone Black	133
Modos de Configuración de pines del BeagleBone Black.....	136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Datos técnicos del producto “Envase de Detergente”	10
Tabla 1.2 Productos y soluciones comerciales existentes	15
Tabla 1.3 Lista de productos y patentes registrados como propiedad intelectual	18
Tabla 1.4 Lista de publicaciones científicas	20
Tabla 1.5 Cuadro económico total.....	36
Tabla 1.6 Cuadro Económico Parcial del Proyecto	37
Tabla 2.1 Cálculo de ruido en uV según la ganancia y SPS configurados en ADC ADS1220 (Frecuencia normal del modulador del $\Delta\Sigma$).....	43
Tabla 2.2 Tabla de coeficientes inversos de termopar J	49
Tabla 3.1 Cuadro comparativo de SBCs - Razones de elección del BeagleBone Black.....	59
Tabla 3.2 Cuadro comparativo de ADCs - Razones de elección del ADS1220.....	65
Tabla 4.1 Validación de etapa de adquisición de señales de temperatura mediante los ADC	92
Tabla 4.2 Reglas difusas, FAM de control	99
Tabla 5.1 Validación parcial de etapa de potencia	112
Tabla 5.2 Validación de etapa de adquisición de señales de temperatura de las resistencias calefactoras	115
Tabla 5.3 Validación de etapa de adquisición de señales de temperatura de las resistencias calefactoras	119
Tabla 5.4 Validación de etapa de adquisición de señales de temperatura de las resistencias calefactoras– comunicación desde HMI hacia BBB (temperaturas de referencia)	120
Tabla 5.5 Tabla comparativa de los resultados obtenidos en los seis primeros ciclos de inyección.....	125
Tabla 5.6 Cuadro económico parcial del hardware del proyecto	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Inyectora de Plástico Bole 230 EKII, por www.es.bolemachinery.com , 2019...	3
Figura 1.2. Pellets de plástico, por www.anteckmadison.com , 2019.....	4
Figura 1.3. Esquema de parte de máquina inyectora, por www.fadiplast.com , 2019.	5
Figura 1.4. Herramienta de regulación de sistema de refrigeración, por www.novanative.in , 2019.	5
Figura 1.5. Molde de inyección con sistema de canal caliente de 48 cavidades, por www.spanish.bottling-fillingmachine.com , 2019.	6
Figura 1.6. Esquema de molde de inyección con sistema de canal caliente, adaptado de es.aberyplastics.com , 2019	7
Figura 1.7. Fotografía de colada fría con productos sin retirar, elaboración propia.	8
Figura 1.8. Controlador de temperatura de moldes con sistema de canal caliente marca Husky, por www.husky.co , 2019	9
Figura 1.9. Chiller industrial para máquina de inyección de plástico, por www.naserland.en.alibaba.com , 2018	9
Figura 1.11. Controlador de temperatura de propósito general, por www.autonics.com , 2019	11
Figura 1.10. Fotografía de Producto con llenado parcial, elaboración propia.....	12
Figura 1.12. Diagrama de Bloques General del proyecto propuesto (Elaboración propia). 29	
Figura 1.13. Producto final: Controlador de temperatura de molde de inyección con sistema de canal caliente (Elaboración propia).	31
Figura 2.1. Los headers P8 y P9 del BBB y la funcionalidad por defecto de sus pines, del libro Exploring BeagleBone Tools and Techniques for Building with Embedded Linux, por Molloy, 2019	40
Figura 2.2. Ciclo de ejecución en interacción entre el mainline Linux y una PRU, del libro Exploring BeagleBone Tools and Techniques for Building with Embedded Linux, por Molloy, 2019	41
Figura 2.3. Diagrama de bloques de lazo de control difuso para un sistema o planta general, adaptado de del libro Enfoque práctico de control moderno Con Aplicaciones en Matlab, por Arnáez, 2014.	45
Figura 2.4. Algoritmo del sistema de control difuso, del libro Enfoque práctico de control moderno Con Aplicaciones en Matlab, por Arnáez, 2014.	45

Figura 2.5. Ejemplo de función de membresía de la variable lingüística velocidad, adaptado del libro Enfoque práctico de control moderno Con Aplicaciones en Matlab, por Arnáez, 2014.....	46
Figura 2.6. Ejemplo de FAM para las variables lingüísticas de temperatura y velocidad. (Elaboración propia)	47
Figura 2.7. Curvas características de las termocuplas °C vs mV, adaptado del artículo Thermocouple Analog Front End (AFE) Using RTD and Internal Temperature Sensor of ADS1220 for Cold Junction Compensation (CJC), por Texas Instrument, 2014	49
Figura 2.8. Grafico del símbolo de un tiristor y de equivalencia de un triac del libro Electrónica de Potencia, por Muhammad H. Rashid, 1995.....	50
Figura 2.9. Grafico formas de onda de voltaje de la carga resistiva (inferior) con ángulos de disparo de 30 (a) y 120 (b) grados del libro Electrónica Industrial Moderna, por Timothy J. Maloney, 2006.....	51
Figura 2.10. Curva de la ecuación (2.11) (izquierda) y rango lineal de curva (derecha) de para un Vmax de 2202 en el rango de 0 a 180 grados (Elaboración propia)	51
Figura 2.11. Opto-acoplador MOC3021, adaptado de la hoja técnica MOC3020 THRU MOC3023 OPTOCOUPERS/OPTOISOLATORS, por TI, 1994	52
Figura 2.12. Resistencia calefactora metálica helicoidal, por www.euroheaters.com, 2019	54
Figura 3.1 Diagrama de Bloques General (Elaboración propia)	55
Figura 3.2. Esquema eléctrico general del controlador desarrollado (Elaboración propia).56	
Figura 3.3 Diagrama Pictórico en base al diagrama de bloques general del proyecto propuesto (Elaboración propia).	57
Figura 3.4. Diagrama de bloques del BeagleBone Black, del manual BeagleBone Black System Reference Manual, por beagleboard.org, 2014.....	58
Figura 3.5. Diagrama de bloques del ADC ADS1220, adaptado de la hoja técnica ADS1220 4-Channel, 2-kSPS, Low-Power, 24-Bit ADC with Integrated PGA and Reference, por Texas Instruments, 2013.	64
Figura 3.6. Tabla de características principales del semiconductor TRIAC BTA316X, adaptado de la hoja técnica BTA316X series B, C and E, por TI, 2017	68
Figura 3.7. Gráfico de disipación de potencia del semiconductor para las distintas corrientes de trabajo y ángulos de conducción (disparo), por TI, 2017	68

Figura 3.8 Esquemático de conexión entre BBB y pantalla táctil Nextion 10" (Elaboración propia).....	70
Figura 3.9. Esquemático de conexión de BeagleBone Black con etapas aledañas (Elaboración propia).....	72
Figura 3.10. Esquemático parcial (RACK 1) de circuito de potencia (Elaboración propia).....	73
Figura 3.11. Valores de amplitud V_{rms} para termo-resistencia controlada a diferentes ángulos de disparo del TRIAC. (Elaboración propia)	74
Figura 3.12. Fotografía del disipador térmico SK129635 (Elaboración Propia).....	76
Figura 3.13. Esquema eléctrico circuito de detección de cruce por cero. (Elaboración propia).....	76
Figura 3.14. Diseño de filtro (capacitores comunes y diferenciales), adaptado del libro Thermocouple Analog Front End (AFE) Using RTD and Internal Temperature Sensor of ADS1220 for Cold Junction Compensation (CJC), por TI, 2014	78
Figura 3.15. Esquemático de circuito de filtro de 1 ADC, parte de una tarjeta ADC. (Elaboración propia)	80
Figura 3.16 Esquemático de circuito ADC, parte de una tarjeta ADC. (Elaboración propia)	82
Figura 3.17. Esquemático bus SPI. (Elaboración propia)	83
Figura 4.1. Diagrama de Bloques General de Programación (Elaboración Propia).....	85
Figura 4.2. Diagrama de Bloques de Software - Inicialización del Sistema. (Elaboración Propia)	86
Figura 4.3. Diagrama de Bloques de Software – Adquisición y tratamiento de señales de ADCs. (Elaboración Propia).....	88
Figura 4.4. Diagrama de flujo de programación de la etapa de conversión de valores de ADCs de mV a °C. (Elaboración propia)	90
Figura 4.5 Validación parcial - Lectura de temperaturas del controlador desarrollado referente al medido por multímetro Fluke con termopares en un recinto (Elaboración propia).....	93
Figura 4.6 Diagrama de Bloques de Software – Control difuso para el cálculo de intensidad de las resistencia calefactoras en base a sus temperaturas. (Elaboración Propia)	94
Figura 4.7 Función de membresía de la variable lingüística error de temperatura (Elaboración Propia).....	96

Figura 4.8 Función de membresía de la variable lingüística pendiente (Elaboración Propia).	97
Figura 4.9 Diagrama de flujo de programación de la etapa de fusificación del control difuso (Elaboración propia)	98
Figura 4.10. Diagrama de flujo de programación de la etapa de razonamiento del control difuso (Elaboración propia)	99
Figura 4.11 De-fusificación con método centroide (Elaboración Propia)	100
Figura 4.12. Diagrama de flujo de programación de la etapa de de-fusificación del control difuso (Elaboración propia)	100
Figura 4.13 De-normalizacion del control difuso (Elaboración propia)	101
Figura 4.14. Señal de temperatura (obtenida de termocupla incorporada en resistencia térmica) y señal pulso de entrada (señal eléctrica de 110VAC). (Elaboración propia)	102
Figura 4.15. Diagrama de bloques de lazo de control difuso para la planta (una resistencia térmica), adaptado de del libro Enfoque práctico de control moderno Con Aplicaciones en Matlab, por Arnáez, 2014.	103
Figura 4.16 Grafico de simulación de respuesta de la planta (resistencia térmica dentro de molde de inyección) haciendo uso del controlador difuso implementado en Matlab. (Elaboración propia)	103
Figura 4.17 Diagrama de flujo de software de la comunicación con HMI mediante protocolo serial UART. (Elaboración Propia)	104
Figura 4.18 Diagrama de Bloques de Software – Comunicación con PRU. (Elaboración Propia)	105
Figura 4.19 Diagrama de flujo de programación de la activación de salidas de control (ángulos de disparo) en PRU. (Elaboración Propia)	106
Figura 4.20. Diagrama de Bloques de Software – Programación de GUIDE (Elaboración Propia)	108
Figura 4.21 Pantalla de Acceso en Nextion Editor (Elaboración Propia)	109
Figura 4.22 Pantalla de visualización en Nextion Editor (Elaboración Propia)	109
Figura 5.1 Lecturas de osciloscopio de los voltajes del ángulo de disparo y de la resistencia térmica controlada por etapa de potencia (Elaboración propia)	112
Figura 5.2. Validación parcial - Lectura de temperaturas del controlador desarrollado referente al medido por multímetro Fluke con termopares a la intemperie (Elaboración propia)	114

Figura 5.3 Gráfico de simulación de respuesta de la planta (resistencia térmica dentro de molde de inyección) haciendo uso del controlador difuso implementado en Matlab (simulación) vs el controlador desarrollado (real). (Elaboración propia)	116
Figura 5.4 Fotografía Controlador de Molde de Inyección del cliente (Elaboración Propia)	122
Figura 5.5 Fotografía Sistema de Inyección de Qumir Plast, producto plástico incompleto (Elaboración Propia).....	123
Figura 5.6 Gráfica comparativa de control de temperatura del mismo molde de inyección durante el inicio de producción. (Elaboración propia)	124
Figura 5.7 Gráfica comparativa de calidad de producto por cada ciclo de inyección. (Elaboración propia)	126
Figura 7.1. Tabla de bits de configuración de pines BeagleBone Black, traducido y adaptado del libro Exploring BeagleBone Tools and Techniques for Building with Embedded Linux, por Molloy, 2019	133
Figura 7.2. Ejemplo de Device Tree Overlay – archivo con formato .dts, del libro Exploring BeagleBone Tools and Techniques for Building with Embedded Linux, por Molloy, 2019	134
Figura 7.3. Capas por defecto del BeagleBone Black, del libro Exploring BeagleBone Tools and Techniques for Building with Embedded Linux, por Molloy, 2019	135
Figura 7.4. Capas del BeagleBone Black, del libro Exploring BeagleBone Tools and Techniques for Building with Embedded Linux, por Molloy, 2019	135
Figura 7.5. Header P9 del BeagleBone Black y todas las funcionalidades configurables para sus pines, del libro Exploring BeagleBone Tools and Techniques for Building with Embedded Linux, por Molloy, 2019	136
Figura 7.6. Header P8 del BeagleBone Black y todas las funcionalidades configurables para sus pines, del libro Exploring BeagleBone Tools and Techniques for Building with Embedded Linux, por Molloy, 2019	137

LISTA DE SÍMBOLOS MATEMÁTICOS

blr: Bits libres de ruido

$V_{in_{max}}$: Voltaje máximo de entrada ADC

V_{ref} : Voltaje de referencia del ADC

Ganancia : Ganancia de amplificación del PGA del ADC

$V_{rms_{Ruido}}, V_{pp_{Ruido}}$: Amplitud de ruido rms y pico pico (respectivamente)

r: Número de bits del ADC

$r_{tipo J}$: Número de bits caso termocupla tipo J

$r_{tipo K}$: Número de bits caso termocupla tipo K

rango: Rango de medición de temperatura

res: Resolución del ADC

$H_{RC}(s)$: Función de transferencia dependiente de la variable s

f_c : Frecuencia de corte en Hz

K : Constante con valor $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

T : Temperatura ambiente en °K (298)

V_n : Ruido de resistencia o ruido térmico

C_{dif} : Capacitancia diferencial

C_{cm} : Capacitancia común

C : Valor de capacitancia

R : Valor de resistencia en Ohms

H_{RC} : Función transferencia de filtro pasa – bajas

R_{dif} : Valor de resistencia diferencial

Δf : Ancho de banda del ruido

z^* : Valor centroide

u_z : Valor difuso

z : Valor crisp

$V_{TC}[mV]$: Voltaje de termocupla en mV

a_i : Coeficiente de termocupla (valor depende de i)

T_i : Valor de temperatura (valor depende de i)

$V_{carga\ rms}(\theta)$: Voltaje rms de la carga en funcion del angulo de disparo

V_{max} : Voltaje pico de la funcion sinusoidal

θ : Angulo de disparo

T_j : temperatura de la unión

T_{jmax} : temperatura máxima de la unión segun fabricante

T_a : temperatura del ambiente

w_d : potencia disipada por semiconductor

R_{ja} : suma de las resistencias térmicas existentes entre la unión y el ambiente

R_{jc} : resistencia térmica entre la unión y la cápsula del semiconductor

R_{cd} : resistencia térmica entre la cápsula del semiconductor y el disipador

R_{da} : resistencia térmica del disipador

e_T : Error de temperatura

T_{sp} : Temperatura de referencia

T_{Actual} : Temperatura leida actualmente en la resistencia termica

P_{en} : Pendiente

$T_{Anterior}$: Temperatura leida en una iteracion (software)anterior

K_e : Constante de escalamiento

F_T : Funcion de transferencia

S_{pp} : Variable compleja

INTRODUCCION

Hoy en día la mayoría de productos que se utilizan a diario son fabricados con plástico, es así que, desde cubiertos, dispositivos móviles y brazos ortopédicos, hasta llantas para automóviles y tractores son fabricados con este material. Es de esta forma que la industria del plástico a nivel mundial se ha mantenido en constante crecimiento logrando una producción de más de 348 millones de toneladas de productos de plástico al año (SNI, 2019, pág. 3). Para el caso del sector peruano, según la Sociedad Nacional de Industrias, el Perú dentro de los años 2013 al 2018, expandió su producción un 11,2 % y se encuentra a una tasa de 2.2% de crecimiento anual (SNI, 2019, pág. 6).

Para poder dar forma a este polímero se tienen distintos tipos de técnicas de moldeo, entre estos se puede encontrar el moldeo por inyección, termo formado y soplado como los más utilizados dentro de la industria peruana. Se debe de tomar en cuenta, a pesar de que sea redundante, que para todos los tipos de moldeos es necesario utilizar un molde.

El moldeo por inyección de plástico, tipo de moldeo del cual se hablará a lo largo de esta tesis, fue desarrollado por primera vez en el año 1868 por el inventor americano John Wesley Hyatt en solicitud del fabricante de bolas de billar Phelan y Collander (D&M Plastic Inc.). Este método consiste en introducir el material plástico dentro de un molde, para que de esta manera el plástico pueda adquirir la forma interna de este último. Para esto es necesario elevar la temperatura del plástico para que este pueda pasar a un estado de fluidez que permita ser introducido con facilidad al molde. Una vez que el molde se llene con el material plástico se debe de esperar a que el plástico baje su temperatura y se solidifique para poder extraer el producto final. Para esto se utiliza el canal de refrigeración con el que cuentan todos los moldes.

Los fabricantes de moldes de inyección tienen como objetivo desarrollar productos que satisfagan las necesidades técnicas de sus clientes, tales como geometría de producto a moldear, número de cavidades, ciclo de inyección, por mencionar algunas. El diseño más usado para un molde de inyección emplea el sistema de canal frío o colada fría el cual es utilizado por su simpleza y bajo costo de fabricación. Dicho sistema permite el flujo del material plástico en estado de fluidez a través de canales que se encuentran dentro del molde. Lamentablemente, este sistema presenta desventajas las cuales limitan la eficiencia del proceso de inyección. Por ejemplo, la pérdida de temperatura del plástico que fluye por

medio de los canales dentro del molde conlleva a aumentar la temperatura de este para que se pueda mantenerse en un estado de fluidez, esta acción afecta a las propiedades físicas y químicas del plástico. Así mismo, esta pérdida de temperatura implica un aumento en el ciclo de inyección, ya que se empleará más tiempo para enfriar el plástico.

Por tal motivo en las últimas décadas se han dado cambios en el diseño de los moldes. Uno de los principales avances tecnológicos dentro de la fabricación de moldes fue la creación del sistema de canal caliente (*Hot Runner System*), el cual incrementa la eficiencia en el proceso de inyección en comparación al clásico canal frío. Eso se debe a que este permite mantener la temperatura del plástico estable durante todo su recorrido en el interior del molde debido a la instalación de resistencias calefactoras y termocuplas, con lo cual se eliminan las deficiencias que tiene el sistema de canal frío. Sin embargo, la utilización del sistema de canal caliente requiere la incorporación de un sistema de control de temperatura.

Para el caso de la industria peruana, las PYMES están logrando incorporar esta tecnología en su proceso de inyección. Lamentablemente, debido a los costos elevados de los sistemas de control de temperatura especializados para moldes con sistema de canal caliente, estos optan por utilizar sistema de control de uso general. Estos sistemas, si bien es cierto solucionan la necesidad inmediata de estas empresas, no logran igualar o superar el desempeño de los sistemas de control de temperatura especializados. Los sistemas de control especializados, como los de las empresas Husky y DME, presentan características como el control de moldes de hasta 256 zonas, interfaz orientado al proceso de inyección, arranque suave para las resistencias, diagnóstico del molde, administración de datos, entre otros.

Como se comentó en párrafos anteriores, existe la necesidad de enfriar el plástico para que este pueda solidificarse, para ello se emplea el canal de refrigeración del molde, por el cual fluye refrigerante que permite acelerar el proceso de enfriamiento del plástico. El sistema de refrigeración, para el caso de las PYMES peruanas, es controlado por medio de válvulas de bolas, con las que regulan el flujo de refrigerante.

En la presente tesis se desarrolla un prototipo de sistema de control de temperatura de bajo costo para un molde con sistema de canal caliente de cuatro cavidades para recinto plástico, el cual empleará lógica difusa en el control. Con el apoyo de Q'UMIR PLAST S.A.C., empresa a la producción de productos plásticos, respectivamente, se logró validar el funcionamiento del prototipo a desarrollar.

1. CAPÍTULO 1: ASPECTOS INTRODUCTORIOS

1.1. Situación Problemática y Definición del Problema

1.1.1. Situación Problemática

En el proceso de moldeo por inyección intervienen diversas partes, las cuales se complementan una con otra para realizar un proceso eficiente. Para que el lector pueda tener un contexto claro del tema a tratar es necesario explicar las distintas partes que conforman dicho proceso. Sin embargo, el proceso de inyección es un proceso complejo y explicar a detalle cada una de sus partes sería muy extenso. Debido a esto, se ha decidido explicar solo los siguientes puntos, los cuales se considera necesarios que el lector debe de comprender para poder entender la siguiente tesis:

a) Máquina de inyección de plástico.

Esta máquina, y como su nombre lo dice, permite la inyección del material plástico dentro de un molde de inyección. Distintos factores influyen en el precio de este tipo de máquinas, es así que el tamaño, la tecnología o la marca pueden hacer que su valor supere el millón de dólares americanos. La inyectora de la Figura 1.1 es de la marca Bole, modelo 230EKII, la cual es usada actualmente por la empresa Qumir Plast (cliente).

Figura 1.1. Inyectora de Plástico Bole 230 EKII, por www.es.bolemachinery.com, 2019.

Figura 1.2. Pellets de plástico, por www.antekmadison.com, 2019.

Dentro de las partes de esta máquina se encuentra la tolva de alimentación (ver Figura 1.3), llamada también *Hooper*, parte en donde el operador debe de agregar el material plástico en su estado inicial, conocido como pellets (Figura 1.2). Después, se puede encontrar en la Figura 1.3, el extrusor o cañón extrusor el cual se encarga de aumentar la temperatura de los pellets para poder llevarlos a un estado de fluidez y así permitir su inyección. Así mismo, el cañón extrusor internamente tiene un tornillo o husillo (Figura 1.3) el cual se encarga de realizar la acción de inyectado del plástico. En la parte posterior de la máquina, se ubica un motor y pistón hidráulico (*Drive Unit, Injection Cilinder*), los cuales se encargan de ejercer un movimiento rotacional y lineal en el tornillo, respectivamente. En la parte central de la máquina están dos platos de sujeción para el molde, uno de ellos se encuentra fijo al lado de la salida del cañón extrusor (*Fixed Platern*) y el otro es un plato móvil (*Moving Platern*). Este último cambia su posición para poder abrir o cerrar el molde de inyección, del cual se hablará más adelante. Así mismo, en esta placa móvil se ubica un pistón hidráulico, el cual permite la extracción de los productos plásticos producidos. Ubicado usualmente en la parte posterior de la máquina inyectora¹, está el sistema de regulación de refrigeración (Figura 1.4), este tiene válvulas de bolas para poder regular el caudal en el molde de inyección. En la parte frontal de la máquina se encuentra el panel de control de la máquina inyectora, el cual permitirá la configuración de todo el proceso de inyección². Cabe resaltar que hoy en día es posible encontrar a nivel mundial máquinas inyectoras con tecnologías mucho más avanzadas que las expuestas anteriormente, sin embargo, estas no están al alcance las PYMES peruanas.

¹ El sistema de refrigeración, así como el controlador del molde de inyección, no son parte de una máquina inyectora.

² El panel de una máquina inyectora no controla el sistema de enfriamiento ni la temperatura del molde de inyección.

Figura 1.3. Esquema de parte de máquina inyectora, por [www. fadiplast.com](http://www.fadiplast.com), 2019.

Figura 1.4. Herramienta de regulación de sistema de refrigeración, por [www. novanative.in](http://www.novanative.in), 2019.

b) Molde de inyección.

Un molde de inyección se basa en la unión de dos secciones complementarias de acero, donde dicha unión posee la forma del producto final que se quiere moldear. Dentro del diseño del molde se puede contemplar que al juntar ambas partes forme un solo producto o una gran cantidad del mismo, tomando en cuenta que, a mayor cantidad de productos a moldear, se incrementa el tamaño y costo del molde. En la Figura 1.5 por ejemplo, se muestra un molde de inyección de tamaño mediano para 48 cavidades.

Figura 1.5. Molde de inyección con sistema de canal caliente de 48 cavidades, por www.spanish.bottling-fillingmachine.com, 2019.

Se le denomina cavidad al conjunto de las partes internas del molde que forman un solo producto. De esta forma se puede clasificar a un molde por la cantidad de cavidades que posee, lo cual indicará la cantidad de productos que produce en cada cierre del molde. A estas también se le conocen como cavidades hembra y macho según su ubicación. El precio de los moldes de inyección varía según su complejidad. Ya sea por la cantidad de cavidades a inyectar, el tamaño o dimensión del molde, o la tecnología usada en su fabricación, estos pueden llegar a superar el costo de una máquina inyectora.

Como se comentó, el molde consta de dos partes, estas en la mayoría de los casos se definen como lado macho y hembra. El lado hembra se ubica en el plato fijo de la máquina inyectora, esta parte tiene un orificio, conocido como bebedero, por donde el cañón extrusor inyectará el material plástico (ver Figura 1.6). El lado macho se ubica en el plato móvil de la máquina inyectora, este lado del molde cuenta con un sistema de expulsión para el producto o productos a inyectar, el cual es accionado mediante el pistón hidráulico que la máquina inyectora tiene en la placa móvil. Cabe resaltar que la posición de los lados macho y hembra pueden cambiar de ubicación según el diseño del molde. Ambos lados del molde, cuentan con canales de refrigeración independientes, los cuales son conectados al sistema de regulación de refrigeración de la máquina inyectora.

Figura 1.6. Esquema de molde de inyección con sistema de canal caliente, adaptado de es.aberyplastics.com, 2019

A continuación, se describirán las dos tecnologías usadas para la fabricación de los moldes, el sistema de colada fría y el sistema de canal caliente. El método de inyección por colada fría permite la distribución del material plástico desde el bebedero hasta las cavidades del molde, teniendo como finalidad mantener constantes la presión y temperatura del material a inyectar. Para conseguir esto, dentro del molde se diseñan canales por donde fluiría el material plástico, a estos se le denominan canales de colada fría. La ventaja principal de este método de inyección es su bajo costo de construcción. Sin embargo, presenta desventajas como un largo ciclo de inyección, generación de mermas (Figura 1.7), necesidad de procesos secundarios como la separación de la cola fría de los productos, limitación en cantidad de cavidades, entre otros, según la publicación realizada por la empresa fabricante de máquinas inyectoras (MILACRON, 2018).

Figura 1.7. Fotografía de colada fría con productos sin retirar, elaboración propia.

Por otro lado, el método de inyección con canal caliente, como el molde mostrado en la Figura 1.6, emplea una tecnología que de igual forma permite la distribución del material desde el bebedero hasta las cavidades del producto. La diferencia principal es que este tiene la particularidad de permitir el control de la temperatura del plástico que pasa a través de todo el molde, ya que cuenta con actuadores (resistencias térmicas que generan calor por el canal) y sensores (termopares incrustados en el interior de las resistencias térmicas) instalados en su interior³.

De esta forma permite mejorar el ciclo de inyección⁴, ya que se elimina el tiempo utilizado en llenar todo el canal de colada y se llena cada cavidad al mismo tiempo. Así mismo, al no generar una colada fría se evita el desperdicio de materia prima, la necesidad de reprocesar la colada fría y el proceso secundario de separar la colada fría de los productos.

También, al utilizar un controlador de temperatura especializado para moldes con sistema de canal caliente (como el mostrado en la Figura 1.8) para todo el canal por donde fluirá el material se puede garantizar que las propiedades físicas y químicas del plástico se mantengan. Para el caso de la colada fría, en algunos escenarios, es necesario elevar la temperatura y presión en el plástico para poder llenar con éxito todas las cavidades. Esto no solo ocasiona una pérdida en las propiedades físicas y químicas del polímero, sino que afecta directamente a la vida útil del molde y la máquina inyectora.

³ Los actuadores y sensores se encuentran en casi todo el sistema de canal caliente, principalmente en el *manifold* y en los torpedos (ver Figura 1.6).

⁴ Tiempo que demora el proceso de inyección, desde la inyección del producto hasta la expulsión del producto final.

Figura 1.8. Controlador de temperatura de moldes con sistema de canal caliente marca Husky, por www.husky.co, 2019

La desventaja de este método es su costo elevado debido a que posee una compleja construcción. Así mismo, la necesidad de contar con un sistema de control de temperatura especializado añade otro costo más. A pesar de lo mencionado, el método de canal caliente es muy utilizado a pesar de las desventajas expuestas, ya que este optimiza significativamente el proceso de inyección.

c) Sistema de enfriamiento de refrigeración.

El sistema de enfriamiento es una máquina como la que se muestra en la Figura 1.9 que trabaja en conjunto con la inyectora, la cual permite enfriar el molde a temperaturas adecuadas de trabajo.

Figura 1.9. Chiller industrial para máquina de inyección de plástico, por www.naserland.en.alibaba.com, 2018

d) Proceso de inyección

Se describe a continuación el proceso de inyección utilizando un molde con sistema de canal caliente. El proceso de inyección inicia con la selección de las variables adecuadas para el proceso, las cuales se obtienen a partir de los datos técnicos del producto y del molde a inyectar. Los datos técnicos utilizados usualmente se listan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1
Datos técnicos del producto “Envase de Detergente”

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
Producto	Envase Detergente	-
Peso	16g	g
Espesor de Material	0.8 mm	mm
Material	PS	-
T° Trabajo del Material	210	°C
Cavidades	2	-
Sistemas de Inyección	Canal Caliente	-

Nota: Ejemplo de información de los datos técnicos del producto y molde (Elaboración propia).

Con estos datos técnicos, el operador procede a ingresar las variables y parámetros al controlador de la máquina inyectora, al controlador del molde con sistema de canal caliente y al controlador del sistema de enfriamiento para poder dar inicio proceso de inyección. Cabe resaltar que, durante el proceso, variables tales como presión de inyección, velocidad de inyección, entre otras, serán cambiadas con la finalidad de mejorar el proceso.

A partir de lo anteriormente descrito, el operador debe de procurar que el molde a instalar se encuentre en perfectas condiciones, es decir que este se encuentre habilitado para la producción. A causa de que este tipo de moldes con sistema de canal caliente cuenta con una parte eléctrica en su interior, es de suma importancia revisar que no exista ninguna avería interna que pueda ocasionar algún accidente. Esta parte del proceso se dificulta cuando se utilizan sistemas de control de propósito general como el mostrado en la Figura 1.10, ya que estos no tienen una opción de verificación o detección de fallas, por ejemplo, ruptura de sensores o actuadores. Por tal motivo el operador debe verse obligado de verificar cada zona manualmente, y quizás esto no es un problema si se habla de un molde de cuatro o veinticuatro cavidades, pero cuando es uno de ciento veintiocho cavidades el escenario

cambia. Caso contrario ocurre con los sistemas de control especializados, los cuales si tienen esta opción de detección que agiliza de gran manera el proceso.

Figura 1.10. Controlador de temperatura de propósito general, por www.autonics.com, 2019

Una vez validada la parte eléctrica (conexiones de resistencias térmicas y sus sensores de temperatura), el operador puede iniciar la instalación del molde de inyección. Mientras se instala el molde, el operador debe comenzar con el calentamiento del cañón extrusor, de igual forma con la verificación de temperatura del sistema de enfriamiento de refrigeración. Cuando el molde este instalado se procede a realizar las conexiones del sistema de refrigeración y los del sistema de canal caliente.

Si todo lo anteriormente mencionado se encuentra bien, el operador inicia con el calentamiento del sistema del canal caliente. Es aquí donde otro se presenta otra desventaja de los sistemas de control de propósito general, estos no cuentan con opciones de configuración global, de esta forma, si se desea configurar una temperatura inicial para todas las zonas del sistema, debe hacerse manualmente una por una.

Otra desventaja importante de los controladores de uso general es que carecen de una opción de calentamiento en rampa, forma en la que los sistemas de canal caliente deben de ser inicializados. Esto es para poder eliminar cualquier tipo de humedad que pudiera haber en las resistencias del sistema de canal caliente, las cuales pudieran ocasionar fallos. Así mismo, esta forma de calentamiento ayuda a prolongar la vida útil de la resistencia, del molde y de la máquina inyectora en conjunto. Si se hace uso de controladores de uso general, el operador debe simular el calentamiento por rampas de cada zona, controlador por controlador⁵ de manera simultánea.

⁵ La temperatura de cada zona de un molde con sistema con canal caliente debe ser controlada independientemente.

Una vez que el cañón extrusor y el sistema de canal caliente se encuentren en la temperatura de trabajo se procede a inyectar. A partir de las primeras muestras obtenidas el operador tomará decisiones correctivas de acuerdo a su experiencia para variar los parámetros del proceso. De esta forma, este podría incrementar la temperatura en el cañón extrusor, aumenta la velocidad de inyección, variar el caudal de refrigeración, cambiar la temperatura de las zonas del sistema de canal caliente, etc.

Un control de temperatura preciso para cada zona del sistema del canal caliente permite una mejora en la repetitividad en el proceso de inyección⁶. Eso se refleja en la mejora del ciclo de inyección, lo cual permite disminuir y conservar constante este ciclo, de manera que da la posibilidad a la empresa de tener una mayor productividad y una mejor exactitud en sus tiempos de entrega. Así mismo, la precisión en el control de temperatura permite una confiabilidad de la calidad en los productos terminados, disminuyendo la tasa de rechazo ya sea por problemas como productos finales incompletos (llenado parcial de la cavidad a causa de una baja temperatura del sistema de canal caliente) o productos rechazados por el área de control de calidad (temperaturas elevadas en el sistema de canal caliente ocasiona que el polímero a inyectar pierda sus propiedades físicas y/o químicas). Con los sistemas de control de temperatura de uso general la precisión de control es mínima, y según el cliente estos controladores presentan los problemas de producción mencionados de forma concurrente.

Figura 1.11. Fotografía de Producto con llenado parcial, elaboración propia.

Es una actividad usual no tomarle la debida importancia al sistema de refrigeración del molde, sin embargo, esta es una variable del proceso que tiene gran impacto en el correcto funcionamiento del sistema de canal caliente. La manera común en la que se regula el sistema

⁶ La repetitividad no solo depende del control del sistema de control de temperatura, también depende de otras variables como lo es la máquina inyectora, material a inyectar, etc.

de refrigeración es utilizando válvulas de bola (Figura 1.4), la cuales son reguladas empíricamente según la destreza del operador. Esto conlleva a que la repetitividad de la regulación del sistema de refrigeración sea deficiente. La incorrecta regulación del sistema de refrigeración se encuentra relacionada directamente con los siguientes problemas:

- Llenado parcial del producto final.
- Obstrucción del canal caliente.
- Deformación en la geometría del producto final.
- Contracción del producto final variable durante los ciclos de inyección.

Otro aspecto relacionado al proceso de regulación de temperatura del sistema del canal caliente es la administración de datos. Esto se refiere al almacenamiento y visualización adecuado de las variables del proceso. Las PYMES, que utilizan sistemas de control de propósito general, no tienen la opción de almacenar ni visualizar estos datos en el sistema de control. Por tal motivo, utilizan la capacidad de retención de datos del operador o medios escritos para poder guardar las variables con las que se ha configurado el sistema de control. De esta forma se pierde dicha información y se requiere realizar la regulación desde cero.

Cuando el operador tenga una muestra que apruebe sus parámetros de calidad, este dejara de modificar las variables del proceso y colocara la máquina inyectora en modo automático.

Según la empresa Q'umir Plast, para el sector plástico nacional, en específico el sector PYME, existe la necesidad de obtener un proveedor local que desarrolle sistemas de control de temperatura especializados para sistemas de canal caliente.

Con los argumentos mencionados anteriormente, se concluye la necesidad de desarrollar sistemas de control especializados para este rubro industrial, no solo para lograr una mayor eficiencia en el proceso de inyección, sino que paralelamente esto genera un incremento en la competitividad industrial de las PYMES. Así mismo, crea un nuevo nicho de negocio en el mercado peruano, ya que, como se mencionó anteriormente, la oferta local de este tipo de sistemas es escasa o nula.

1.1.2. Definición del Problema

1.1.2.1. Problema General

Escasa oferta de controladores de temperatura especializados para moldes de inyección de plástico de sistema de canal caliente, con una interfaz amigable que permita mejorar la operación de producción de objetos de plástico y que se encuentren al alcance económico de las PYMES del país.

1.1.2.2. Problema Ingenieril

¿Qué consideraciones tecnológicas e ingenieriles de diseño electrónico y diseño de software se tienen que llevar en cuenta, a fin de desarrollar un prototipo de sistema de control de temperatura de bajo costo y especializado para moldes con sistema de canal caliente que satisfaga los requerimientos de las PYMEs del país, el cual consiste en un controlador embebido que integre etapas de interfaz HMI, E/S, ADC, control y potencia, que tenga un de error máximo de 0.1°C en medición y 1°C en control, trabaje a tiempo real con un retardo máximo de 0.8s, mejore la interfaz HMI integrando la operación de todas las zonas en un solo panel táctil, permita un correcto almacenamiento de datos, sea económicamente accesible y con dimensiones físicas máximas de 40x40x120cm, con el objetivo de mejorar la operación en el proceso de inyección de plástico?

1.2. Estado del Arte

1.2.1. Productos y soluciones comerciales existentes

La Tabla 1.2 a continuación lista los productos y soluciones comerciales existentes en el mercado en la actualidad.

Tabla 1.2

Productos y soluciones comerciales existentes

No.	Nombre del producto, modelo y foto	Fabricante y costo	Breve descripción	Fortalezas	Debilidades que pueden ser subsanadas con la solución propuesta
1	Control de Temperatura Altanium Delta 5	Husky Injection Molding Systems, 250 mil USD (120 canales), 5500 USD (8 canales) aprox.	Husky es una empresa canadiense muy respetable en la industria del plástico a nivel mundial. Ellos se encargan de desarrollar máquinas inyectoras, moldes de inyección y controladores de temperatura de canal caliente. Los controladores de esta empresa utilizan una tecnología que ellos denominan Tecnología de Razonamiento Activo.	<ul style="list-style-type: none"> • Diseñado para el control de moldes de 96 cavidades o menos. • Monitor táctil de 15.6" para la configuración del controlador. • Diagnostico automático del molde. • Reducción del ciclo de inyección. • Precisión de medición de 0.5°C. • Manejo de cargas resistivas de hasta 16 Amp. 	<ul style="list-style-type: none"> • El diseño de las tarjetas de control que utiliza este controlador de temperatura, incorpora todas las etapas en un solo PCB (adquisición de datos, potencia y control). El diseño propuesto presenta etapas modulares, las cuales permitirán realizar mantenimientos preventivos y correctivos con mayor rapidez y a menor costo. • El elevado costo de este controlador lo hace totalmente inaccesible para las PYME.

2	<p>Controlador de temperatura – CW992 Slim</p>	<p>YUDO, 180 mil USD (120 canales), 5000 USD (8 canales) aprox.</p>	<p>YUDO es una compañía coreana que se centra en la fabricación de sistemas de canal caliente. Esta empresa también desarrolla y vende sus sistemas de control de temperatura.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 0.1°C de precisión en medición. • Ciclo de muestreo de 20 ms. • Diagnostico automático. • Algoritmo PID. • El prototipo utiliza lógica difusa para controlar la temperatura. 	<ul style="list-style-type: none"> • El elevado costo de este controlador lo hace totalmente inaccesible para las PYME. • No dispone de control con lógica difusa.
3	<p>Controlador de temperatura Smart Series TSP M2L 144 zonas</p>	<p>DME, 60800 USD (128 canales), 4800 USD (8 canales)</p>	<p>DME es una empresa estadounidense, la cual desarrollo productos empleados la fabricación de moldes de inyección desde el año 1942.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Diagnostico automático. • Manejo de cargas resistivas de hasta 15 Amp. • Algoritmo de sintonización automática (<i>auto-tunning</i>). • Iniciación de calentamiento de arranque suave. • Pantalla de 5.7 Pulgadas 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado costo del controlador. • No dispone de control con lógica difusa.

4	PLC1200 + HMI touch + RunTime WinCC	Siemens, (2 SM 1231 AI4 x TC + 1 DOx8 + winCC), 15 mil USD aprox.	El PLC 1200 de Siemens es un controlador modular de gama baja de alta confiabilidad para cualquier tipo de proceso industrial (previa programación)	<ul style="list-style-type: none"> • Dispositivo industrial de gama baja modular. Robustez y calidad de arquitectura. • A comparación de otros modelos y marcas, tiene embebido E/S en la misma CPU. • WinCC RunTime ofrece monitoreo a tiempo real. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de varios (cantidad y variedad) módulos para desarrollar el proyecto. • Elevado costo del controlador. • El elevado costo del controlador, módulos E/S especiales, HMI y SCADA.
---	---	---	---	---	---

Nota: Se listan los equipos y soluciones comerciales en el actual mercado, así como sus fortalezas y debilidades (Elaboración propia).

1.2.2. Propiedad intelectual registrada

Se listan a continuación en la Tabla 1.3, los productos y patentes registrados como propiedad intelectual que tienen relación directa con el producto propuesto y solucionan la problemática planteada.

Tabla 1.3

Lista de productos y patentes registrados como propiedad intelectual

No.	Nombre de la Invención	Institución de registro y No. de Patente	Breve Descripción	Debilidades en innovación que pueden ser subsanadas con la solución propuesta
1	Control principal del sistema de control de temperatura	LI JIULUN, CN201410845835 20141231	La patente mencionada desarrolla un sistema embebido el cual tiene como objetivos agrupar todas las etapas de un sistema de control de canal caliente.	<ul style="list-style-type: none"> La patente no propone la administración de datos del proceso.
2	Sistema de control de temperatura de sistema de canal caliente con pantalla táctil	XU YUNPENG, CN201510105946 20150311	La patente menciona el desarrollo de un sistema de control de temperatura similar al mencionado por DME.	<ul style="list-style-type: none"> La patente no propone la administración de datos del proceso.

Nota: Se ha realizado una búsqueda de las patentes desde la base de datos europea Espacenet, indicando una breve descripción de las mismas y las debilidades encontradas. (Elaboración propia).

1.2.3. Aportes de Innovación

El sistema desarrollado es un prototipo de controlador embebido y con interfaces de adquisición y potencia modulares a bajo costo. El sistema emplea lógica difusa para el control de temperatura de un molde de sistema de canal caliente, el cual permite un control robusto y estable de la temperatura de cada zona/sección del molde en misión. La lógica difusa permite que el operador necesite menos experiencia operacional en el sistema de inyección plástica y garantiza el cuidado y correcto control de temperatura del molde de inyección de plástico.

1.2.4. Publicaciones Científicas/Académicas/Ingenieriles

Se listan en la Tabla 1.4 las publicaciones científicas (papers, tesis o proyectos anteriores) que aportan conocimiento a la investigación y desarrollo de la tesis mediante métodos, teorías y procedimientos científicos/ingenieriles.

Tabla 1.4

Lista de publicaciones científicas

No.	Título de la Publicación y Autores	Datos de la Publicación:	Fortalezas de la publicación	Debilidades de la publicación que van a ser subsanadas con la solución propuesta
1	<i>Design of the Fuzzy PID Controller for the Hot Runner Temperature Control System</i> , Zhen Zhen y Yan Gao	<ul style="list-style-type: none"> • Artículo científico en conferencia. • 6 paginas. 	Control de temperatura utilizando lógica difusa para sintonizar los parámetros PID	<ul style="list-style-type: none"> • La carga computacional del software es muy elevada.
2	<i>Temperature investigation in real hot runner system using a true 3d numerical method</i> , T.-C. Chen, Y.-C. Chiu, W.-D. Wang, Chao-Tsai Huang, C.-L. Hsu, C.-Y. Lin, L.-W. Kao	<ul style="list-style-type: none"> • Este artículo fue publicado por la empresa Moldex 3D. • 6 paginas. 	Control de temperatura desarrollo través de computadora para validar el uso de simuladores CAE Moldex 3d.	<ul style="list-style-type: none"> • Esta publicación muestra los resultados obtenidos desde una simulación. • Utiliza un control ON/OFF, lo que puede dañar el actuador.

3	<p><i>Fuzzy Logic Based Intelligent Controller Design for an Injection Mould Machine Process Control</i>, Dr. I Santi Prabha, K Durga Rao, D Siva Rama Krishna</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Artículo científico en revista. • 6 paginas. 	<p>En esta publicación se desarrolla en Matlab/Simulink un controlador PID el cual es sintonizado mediante lógica difusa. En este <i>paper</i> de logra mostrar demostrar la robustez del método de control elegido.</p>	<p>Esta publicación muestra resultados obtenidos desde una simulación y no se valida en un escenario real.</p>
4	<p><i>An Injection Molding Study. Part II: Evaluation of Alternative Control Strategies for Melt Temperature</i>, V. G. Gomes W. I. Patterson M. K. Kamal</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Artículo publicado por Society of Plastics Engineers. • 7 hojas. 	<p>En esta publicación se estudia diferentes tipos de algoritmos de control para evaluar su desempeño en el control de temperatura del extrusor de una máquina inyectora de plástico. Este caso es muy similar a lo que se ve dentro del molde con sistema de canal caliente.</p>	<p>Esta publicación muestra resultados obtenidos en una simulación.</p>

5	<i>PID and fuzzy logic in temperature control system</i> , Mohammed Elnour, Waleed Ibrahim Mohammed Taha	<ul style="list-style-type: none"> • Artículo científico publicado en la conferencia internacional de ingeniería computacional, eléctrica y electrónica, 2013 (ICCEEE). • 6 hojas. 	En esta publicación se compara el desempeño del control difuso versus el control PID tradicional, evidenciando las ventajas que el control difuso muestra de forma experimental.	La publicación desarrolla algoritmo de control para un recinto de laboratorio a temperaturas bajas (20 – 60 °C)
6	<i>Temperature Control System using Fuzzy Logic</i> , P. Singhala, D. N. Shah, B. Patel	<ul style="list-style-type: none"> • Artículo científico publicado en la revista de instrumentación y sistemas de control (IJICS) Vol. 4, N° 1, Enero 2014. • 10 Hojas. 	En esta publicación se diseña un controlador de temperatura y se presenta el desempeño del mismo en forma experimental.	La publicación desarrolla algoritmo de control para un recinto de laboratorio a temperaturas bajas (20 – 60 °C)
7	<i>Temperature Control System Using Fuzzy Logic Technique</i> , Isizoh A. N., Okide S. O, Anazia A.E, . Ogu C.D.	<ul style="list-style-type: none"> • Artículo científico publicado en la revista internacional de investigación avanzada en inteligencia artificial (IJARAI), Vol 1, N° 3, 2012. • 5 Páginas. 	En esta publicación se diseña un controlador de temperatura y se presenta el desempeño del mismo en forma experimental.	La publicación desarrolla algoritmo de control para un recinto de laboratorio a temperaturas bajas (20 – 60 °C)

8	<p><i>Realization of Fuzzy Logic in Temperature Control System over PID,</i></p> <p>Anil Kumar .K, Jyoshna. P, Seshadri .G</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Artículo científico publicado en la revista internacional de investigación en ingeniería y tecnología (IJERT), Vol 3, Tema 7, Julio, 2014. • 6 Páginas. 	<p>En esta publicación se compara el desempeño del control difuso versus el control PID tradicional, evidenciando las ventajas que el control difuso muestra de forma experimental.</p>	<p>La publicación evidencia que a altas temperaturas el controlador no tiene notables desviaciones en el control.</p>
---	--	--	---	---

Nota: Se ha realizado una búsqueda de las publicaciones científicas que más aporten en conocimiento a la tesis (mediante métodos, teorías y procedimientos científicos/ingenieriles), indicando una breve descripción de las mismas, sus fortalezas y sus debilidades encontradas. (Elaboración propia).

1.2.5. Aportes de conocimiento nuevo, procedimientos, métodos y/o aplicaciones

Se lista a continuación los aportes de conocimiento:

- El proyecto presenta una modulación suave de tensión en el circuito potencia para evitar el daño de las resistencias térmicas.
- El proyecto controla la velocidad de calentamiento del actuador para la protección de daños en el molde de inyección.
- El proyecto usa lógica difusa para el control de temperatura usando la velocidad de la señal de temperatura y la señal de error referente al punto de referencia (*set point*).
- El proyecto se valida en un escenario real.

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación respecto a beneficios para el usuario, cliente o patrocinador del proyecto

La solución a la problemática planteada beneficia al cliente en los siguientes aspectos:

- Se obtiene mejoras en el proceso de inyección (comparado al uso de controladores de aplicación general) mediante:
 - Mejora del tipo de control de temperatura del sistema de canal caliente reemplazando el control PID por un control difuso.
 - Mejora el tiempo de puesta en marcha de producción alcanzando la temperatura de referencia a una velocidad mínima que evite los cambios bruscos.
- Se reduce el costo del controlador temperatura para moldes de inyección plástica de sistema de canal caliente, con respecto a los controladores especializados para la aplicación mencionados en el ítem 1.2.1.
- Se mejora la interfaz entre el operador y el sistema, haciendo uso de un panel táctil de operación que integra el control de todas las zonas del molde de inyección.
- Los impactos globales que genera el ingreso de este controlador al mercado son:
 - Mejora en la operación de sistemas de inyección plástica que trabajen con moldes con sistema de canal caliente.
 - Mayor accesibilidad a las PYMES para adquirir equipos de alta tecnología especializados y a bajo costo.

- Accesibilidad local de mantenimiento o reparaciones del controlador desarrollado.

1.3.2. Justificación Ingenieril

El proyecto implica la solución de los siguientes problemas ingenieriles:

- Desarrollar un prototipo de sistema de control de temperatura de bajo costo. Para ello se hicieron los siguientes estudios científicos previos:
 - Selección de equipos y componentes electrónicos de calidad y de bajo costo. Para ello, se realizó estudios de diseño electrónico, software y circuitería.
- Desarrollar un prototipo especializado para moldes con sistema de canal caliente que utilice control moderno. Para ello se hicieron los siguientes estudios científicos previos:
 - Diseño de las diversas etapas de hardware: Adquisición, filtraje de señal, potencia, interfaz, tablero de control.
 - Selección de controlador/procesador que sea capaz de integrar todas las etapas del prototipo.
 - Desarrollo de software de integración.

Para resolver el problema realizó la evaluación los siguientes procedimientos y técnicas:

- Estudio de controladores especializados y de uso industrial y su método de control para los sistemas de canal caliente.
- Evaluación del criterio de los operadores para manipular los sistemas de inyección y el controlador del molde para la migración al control difuso.
- El control debe tener un error máximo del 1°C. Para ello se hicieron los siguientes estudios científicos previos:
 - Investigación los métodos de tratamiento de señales analógicas de baja amplitud (rango de mV).
 - Diseño de circuito de adquisición y tratamiento de señales analógicas.
 - Desarrollo de software para un control robusto de las resistencias térmicas de los moldes.

Para resolver el problema se realizó la evaluación los siguientes métodos y procedimientos:

- Validación parcial, contrastación del valor leído de temperatura del controlador propuesto con el de un equipo/dispositivo verificador calibrado (Fluke 179).
- Evaluación de las variaciones que existe en el control con las diferentes resistencias.
- El equipo propuesto debe trabajar a tiempo real con un retardo máximo de 0.8s. Para ello se realizaron los siguientes estudios científicos previos:
 - Búsqueda de controlador multifunción que permita realizar un control a tiempo real con un retardo de ciclo máximo de 0.8s.
 - Por otro lado, el controlador debe tener la capacidad de hacer un control de potencia por ángulo de disparo (para cada una de las 8 zonas), por lo que necesitara tener un retardo mucho menor a 8ms⁷.

Para resolver el problema se realizó la evaluación con los siguientes métodos:

- Medir el tiempo de ciclo de todo el proceso realizado por software.
- Optimizar el software de control de fase (ángulo de disparo).
- Verificar el uso de un hardware que permita una la ejecución de software con tiempo de ciclo menor a 8ms.
- El espacio ocupado por el controlador no debe sobrepasar las dimensiones de 40x40x120cm. Para ello se realizó un diseño de dimensionamiento, reduciendo al máximo el espacio de distribución de cada uno de los dispositivos y componentes que conformen en conjunto el controlador propuesto. El modelo de distribución debe ser ordenado y similar a los tableros de control industrial de alta gama usados en la industria.
- Permitir un correcto almacenamiento de datos. Para resolver el problema se evaluaron los siguientes métodos y procedimientos:
 - Verificar la cantidad de almacenamiento disponible para almacenar data del proceso (parámetros de control).
 - Verificar que no afecte la carga computacional del proceso que trabaja a tiempo real.

1.3.3. Justificación Económica

En el aspecto económico el proyecto se justifica por lo siguiente:

⁷ Para 8 zonas deberá poder manejar 8 ángulos de disparo dentro del mismo periodo de control de 8ms.

- El precio de venta promedio del controlador propuesto es de 2100 dólares, el cual es un precio accesible para las PYMES del país, siendo la mejor opción ante otras:
 - El costo de un controlador de 8 zonas/canales de las marcas Husky o DME es de un promedio de 4000 USD. Sin embargo, estos modelos no permiten escalabilidad, de tal forma que, si se necesita controlar la temperatura de un molde de 9 zonas, se deberá adquirir otro controlador y mucho más costoso.
 - El costo de migración del controlador de 8 zonas a un PLC es de aproximadamente 12000 USD, muy por encima del costo del controlador propuesto.
- En cuanto a la escalabilidad de los controladores y su adaptación a controlar a un mayor número de zonas independientes, Husky y DME presentan modelos de controladores de 128 y 256 canales (zonas) a un costo promedio de 120000 USD. Se pronostica que el costo de un controlador desarrollado con la tecnología propuesta para esa cantidad de canales es de solo 15000 USD.

1.4. Requerimientos técnicos, ingenieriles y operativos

- Diseño ergonómico para el operador. La altura máxima del controlador debe ser a nivel del pecho del operador, siendo este 120cm en base a la estatura promedio del hombre peruano.
- Interface amigable para el operador:
 - Se desea la mayor cantidad de valores de temperatura de las zonas por pantalla (mínimo 8 canales por pantalla)
 - De fácil operación y visualización. Se solicita grafica de tendencias de temperatura de cada zona.
 - Se desea protección de acceso. Deseable un ingreso protegido por registro de usuario y contraseña.
 - Se desea una pantalla de visualización (sin acceso a cambios de temperaturas de referencia) y otra de operación (con el acceso a cambios de temperaturas de referencia).
 - Se desea que la pantalla con colores opacos no llamativos que permita una correcta visualización de las lecturas de temperatura.

- Administración de datos en el equipo para almacenar configuración de temperaturas por moldes.
- Potencia máxima de salida de 5 amperios por zona. Esto debido a que el molde donde se realizaran las pruebas cuenta con resistencias calefactoras con ese valor máximo de trabajo.
- Capacidad de controlar 8 Zonas en simultáneo.
- Alimentación de 220 VAC / 60 Hz.

1.5. Objetivo General

Desarrollar un prototipo de controlador industrial de temperatura de 8 zonas para un molde de inyección de plástico de sistema de canal caliente que permita mejorar el actual proceso de operación y producción de objetos de plástico, con calidad, una buena interfaz con el sistema y de bajo costo para las PYMEs del sector.

1.6. Objetivos Específicos de Desarrollo de la Solución Propuesta

Los objetivos específicos de desarrollo de la solución propuesta son:

- Desarrollar de una estructura metálica que permita resguardar al controlador y sus interfaces de hardware de daños físicos y que brinde comodidad y una interfaz amigable al operador. Indicador: Un gabinete móvil que tenga 1.2 metros de alto y ocupe un área de 30 cm cuadrados y que cuente con la interfaz gráfica de 7" pulgadas de cara al operador del sistema.
- Desarrollar un sistema electrónico de control de temperatura para moldes de inyección de plástico con sistemas de canal caliente. Indicador: Un hardware embebido que permita realizar 8 controles difusos independientes (por cada zona) en el molde, capaz de regular la temperatura con un error máximo de 1 °C.
- Desarrollar un algoritmo computacional que permita integrar 8 ADCs, 8 controles difusos, 8 interfaces de potencia y una interfaz gráfica HMI táctil local. Indicador: Un algoritmo desarrollado en C++ con capacidad de integrar todas las etapas del sistema: Adquisición, Tratamiento, Control Potencia y HMI.
- Validar el funcionamiento del controlador propuesto en un escenario real. Indicador: Correcto funcionamiento del controlador desarrollado en la planta de inyección de plástico Qumir Plast, contribuyendo a obtener productos plásticos de calidad (forma, diseño, grosor, transparencia, dureza).

1.7. Breve descripción de la solución propuesta

1.7.1. Diagrama de Bloques

Se presenta a continuación en la Figura 1.12, el diagrama de bloques general del producto propuesto:

Figura 1.12. Diagrama de Bloques General del proyecto propuesto (Elaboración propia)

1.7.2. Funcionamiento

Paso 1: HMI

La solución cuenta con una interfaz gráfica HMI (Pantalla táctil) con el que se logra monitorear y establecer los valores de puntos de referencia (*set points*) de temperatura de cada zona del molde de inyección establecidos por el operador del sistema. Estos valores de control y monitoreo son enviados y recibidos (respectivamente) hacia y desde el bloque de control del diagrama.

Paso 2: Microcomputador BeagleBone Black

El controlador del sistema lo compone un SBC de la marca Beaglebone. Este microcomputador se encarga de recibir los datos de temperatura del bloque ADC y los valores de los puntos de referencia del HMI. Ambos grupos de señales son procesadas para calcular los valores de control y luego estos últimos sean enviados hacia la etapa de potencia.

Paso 3: Interfaz de potencia

La etapa de potencia está conformada por un circuito de control de voltaje por ángulo de disparo. Este recibe el valor de ángulo de disparo del SBC y actúa proporcionando un voltaje

regulado al actuador. Este bloque contiene circuitos independientes por cada zona del molde de inyección.

Paso 4: Molde de inyección

Paso 4.1: Actuador

El actuador recibe el voltaje de control del bloque de potencia. Cada actuador está compuesto de una resistencia calefactora la cual se encuentra en el interior del molde. Este bloque contiene actuadores independientes por cada zona del molde de inyección.

Paso 4.2: Sensor

El calor emitido por los actuadores es medido por la etapa de sensado. Está compuesto por sensores tipo termopar. Este bloque contiene sensores independientes por cada zona del molde de inyección.

Paso 5: Acondicionador de señal

Las señales de los sensores son acondicionadas por este bloque. Consta de un filtro pasa bajas y un amplificador de señal. Este bloque contiene circuitos independientes por cada sensor en el sistema.

Paso 6: ADC ADS1220

La señal de salida del acondicionador ingresa al conversor analógico digital sigma-delta. La señal de salida del bloque se envía al SBC mediante un protocolo de comunicación. Este bloque contiene un conversor por cada sensor en el sistema.

1.7.3. Ilustración del Producto Final

Se presenta a en la Figura 1.13 una fotografía del producto final:

Figura 1.13. Producto final: Controlador de temperatura de molde de inyección con sistema de canal caliente (Elaboración propia).

1.7.4. Alcances y limitaciones de la solución propuesta

Los alcances del proyecto son los siguientes:

- Controla la temperatura de un molde con sistema de canal caliente de 4 cavidades (8 zonas) mediante lógica difusa, logrando un margen de error menor a 1°C.
- Controla la temperatura del molde con sistema de canal caliente con múltiples sistemas SISO.
- Mejora la interfaz del sistema de control mediante un Panel HMI Touch, permitiendo al usuario visualizar y almacenar datos del proceso.
- El equipo propuesto trabaja actualmente con 8 zonas de control debido a que esta es la cantidad requerida por el sistema de canal caliente del molde donde va a trabajar.

- El controlador está diseñado para controlar resistencias calefactoras que cuentan cada una con una termocupla interna del tipo J.
- El controlador está diseñado para trabajar con alimentación de 220 VAC.

Las limitaciones del proyecto son:

- El controlador propuesto está diseñado para trabajar con un molde específico.
- El controlador desarrollado es un prototipo, no cuenta con protección básica a nivel industrial.
- El controlador no integra las variables de la máquina inyectora (presión de inyección, velocidad de inyección, fuerza de cierre del molde, etc.). En la actualidad, las máquinas inyectoras no cuentan con un controlador de temperatura integrado, debido a que cada molde tiene una configuración particular (cantidad de cavidades, diseño de canal caliente, etc.)
- Debido al diseño de la tarjeta de potencia, la corriente de trabajo de la carga debe ser menor a 5A.

1.7.5. Aplicaciones directas e Indirectas de la solución propuesta

Las aplicaciones en las que puede ser utilizada el controlador propuesto son:

- Procesos de control de temperatura de moldes con sistema de canal caliente para 8 zonas.
- Procesos de control de temperatura de moldes con sistema de canal caliente para una cantidad menor a 8 zonas.

Bajo algunos ajustes previos, el controlador propuesto puede trabajar también para otras aplicaciones:

- Controlador de temperatura para molde con sistema de canal caliente con hasta 256 zonas. Para ello hay que agregar al sistema más hardware de interfaz de adquisición y de potencia, de forma que puedan ser integrados al SBC BeagleBone Black mediante protocolos de comunicación (SPI).
- Controlador de temperatura para el mismo sistema, pero con otro tipo de termocuplas. Para ello se debe calibrar previamente por software la ganancia del ADC y su respectiva conversión.

- Controlador de temperatura de aplicación general para cualquier tipo de sensor. Se debe regular previamente la ganancia y conversión del ADC por software.

1.8. Viabilidad

La viabilidad del proyecto y el desarrollo de la solución propuesta son descritas a continuación:

1.8.1. Viabilidad técnica

a. Capacitación del personal: Los conocimientos con los que cuentan los autores del proyecto para enfrentar los retos que implica el desarrollo de la solución propuesta y el cumplimiento de los objetivos son:

- Ingeniería de control moderno: Aplicación del control difuso en múltiples sistemas SISO.
- Software para Ingeniería: Aplicación de programación en lenguaje C++.
- Micro-controladores: Aplicación en trabajo con SBC.
- Sistemas Embebidos: Aplicación en integración de etapas de hardware y software en micro-computadoras.
- Diseño de Circuitos Electrónicos: Aplicación en diseño y desarrollo de tarjetas electrónicas.
- Electrónica de Potencia: Aplicación para el diseño e implementación de la etapa de potencia del controlador propuesto.

b. Asesoramiento Técnico / Ingenieril: Se contó con asesoría técnica del experto en operación de máquinas inyectoras y dueño de la empresa Qumir Plast SAC, Julio Cucho, quien brindo apoyo durante la operación y toma de información del correcto manejo del sistema de inyección.

c. Infraestructura y Equipamiento Técnico: El proyecto se aplica finalmente en una máquina inyectora de plástico (propiedad del cliente), dentro del molde de inyección de plástico con sistema de canal caliente. El equipamiento en esta infraestructura consiste en un controlador de la máquina de inyección, un sistema de enfriamiento independiente, y un sistema de control de temperatura del molde. Por otro lado, con la finalidad de no depender continuamente de la infraestructura del cliente, el desarrollo y pruebas de validaciones parciales del controlador desarrollado se llevaron a cabo sobre resistencias calefactoras del mismo modelo y forma de las de molde, pero fuera de la máquina inyectora.

d. Requerimientos técnicos del cliente: Se listan a continuación los requerimientos técnicos y el argumento respecto a la forma como se ha cumplido y satisfecho:

- Diseño ergonómico para el operador. La altura máxima del controlador debe ser a nivel del pecho del operador, siendo este 120cm en base a la estatura promedio del hombre peruano. Para ello se ha fabricado un gabinete como el mostrado en la Figura 1.13, el cual contiene en su interior todas tarjetas electrónicas desarrolladas que forman parte del diseño del controlador desarrollado.
- Las resistencias térmicas no deben tener cambios bruscos de temperatura para evitar daños del molde de inyección y de las mismas. Para ello se ha realizado un control de la velocidad de cambio de la temperatura de las resistencias mediante lógica difusa.
- Interface amigable para el operador, que cumpla los requerimientos descritos en el ítem 1.4. Para ello se realizó lógica tanto en el SBC como en la pantalla HMI cumpliendo con las siguientes características:
 - La pantalla táctil usada como HMI para el controlador desarrollado puede mostrar hasta 10 zonas/canales en la misma pantalla.
 - La pantalla HMI permite la visualización de graficas de tendencias de las temperaturas de cada zona.
 - El controlador solicita identificación al operador para ceder acceso de ingreso a la operación del controlador.
 - Se creó una pantalla de visualización y otra de operación, de forma que solo en esta ultima el operador tiene acceso a cambios de temperaturas de referencia.
 - Las pantallas han sido desarrolladas con colores opacos no llamativos.
- Administración de datos en el equipo para almacenar configuración de temperaturas por moldes. Se realizó esto mediante programación en el SBC y la pantalla HMI.
- Potencia máxima de salida de 5 amperios por zona. Las tarjetas de potencia están diseñadas para cortar la alimentación de la carga en caso exista sobre-corrientes.
- Alimentación de 220 VAC / 60 Hz. El diseño de las etapas de control y fuerza está provisto para trabajar con estas características.
- Correcta disipación de etapa de potencia mediante diseño del mismo.

e. Disponibilidad de componentes y materiales: Los materiales y componentes especializados requeridos para el proyecto:

- Inyectora de plástico (provista por el cliente).
- Controlador de Inyectora (provista por el cliente).
- Molde de inyección y termo-resistencias (provista por el cliente).
- Termo-resistencias y termocuplas tipo J internas (materiales de prueba).
- Sistema de refrigeración (provista por el cliente).
- Multímetro digital Fluke 709 (Se distribuye su venta localmente).
- BeagleBone Black, esta SBC puede ser adquirida desde internet (No se distribuye localmente).
- Pantalla táctil Nextion 10”, puede ser adquirida desde internet (No se distribuye localmente).
- Conversor ADS1220, componente de Texas Instrument que puede ser adquirido desde internet (No se distribuye localmente).
- Resistencias, capacitores, reguladores, diodos, TRIACs, transformadores, todos componentes que pueden ser adquiridos localmente y a bajo costo.
- Gabinete metálico a diseño, puede ser construido localmente en empresas metal-mecánicas.

1.8.2. Viabilidad económica

a. Cuadro económico total. Se presenta el cuadro económico total donde se valoriza económicamente todos los componentes, materiales, equipamiento, software y servicios de terceros que son necesarios para el desarrollo de la solución propuesta:

Tabla 1.5
Cuadro económico total

Nombre	Und.	Costo Unitario (Soles)	Costo Total (Soles)	Dispuesto por
Multímetro Fluke 709	1	S/1,500.00	S/1,500.00	
Maquina inyectora	1	S/140,000.00	S/140,000.00	Cliente
Molde de inyección + Componentes	1	S/60,000.00	S/60,000.00	Cliente
Laptop DELL	1	S/5,000.00	S/5,000.00	
Desktop DELL	1	S/3,000.00	S/3,000.00	
Beaglebone Black	1	S/289.80	S/289.80	
Software: Notepad++	1	S/0.00	S/0.00	
Switch TPLINK	1	S/50.00	S/50.00	
Componentes Tarjeta adquisición	10	S/25.20	S/252.00	
Componentes Tarjeta de potencia	10	S/22.05	S/220.50	
Componentes Tarjetas matrices	2	S/15.00	S/30.00	
Servicio Desarrollo de tarjetas	1	S/2,500.00	S/2,500.00	
Fuente 5V nacional	1	S/50.00	S/50.00	
Rollo cable apantallados	1	S/90.00	S/90.00	
Cable UTP	1	S/30.00	S/30.00	
Pantalla Touch Nextion 10"	1	S/620.55	S/620.55	
Chasis	1	S/500.00	S/500.00	
Total Soles			S/212,832.00	

Nota: Se ha realizado el cálculo de costos total de todos los equipos, componentes y productos dispuestos por la universidad, el cliente y los desarrolladores (Elaboración propia).

- b. Cuadro Económico Parcial. Se presenta un cuadro que indica la inversión económica para implementar el proyecto propuesto:

Tabla 1.6
Cuadro Económico Parcial del proyecto

Nombre	Und.	Costo Unitario (Soles)	Costo Total (Soles)
Beaglebone Black	1	S/289.80	S/289.80
Software de programacion: Notepad++	1	S/0.00	S/0.00
Switch TPLINK	1	S/50.00	S/50.00
Componentes Tarjeta Adquisición	10	S/25.20	S/252.00
Componentes Tarjeta de potencia	10	S/22.05	S/220.50
Componentes Tarjetas matrices	2	S/15.00	S/30.00
Servicio Desarrollo de tarjetas	1	S/1,200.00	S/1,200.00
Fuente 5V nacional	1	S/50.00	S/50.00
Rollo cable apantallados	1	S/90.00	S/90.00
Cable UTP	1	S/30.00	S/30.00
Pantalla Touch Nextion 10"	1	S/620.55	S/620.55
Chasis	1	S/500.00	S/500.00
Total Soles			S/3,043.05
Total Dólares			\$966.05

Nota: Se ha realizado el cálculo de costos parcial de todos los equipos, componentes y productos dispuestos por los desarrolladores. Elaboración propia.

Según el cuadro de costos presentado en la Tabla 1.6, la compra de los dispositivos y componentes que corresponden directamente a la fabricación del controlador pueden ser afrontados por los autores del libro (966.05 USD). Por otro lado, los costos externos a la fabricación del producto son actualmente existentes y pertenecen en su totalidad al cliente (200000 soles), según indica la Tabla 1.5.

1.8.3. Viabilidad social

El controlador de temperatura propuesto es viable a nivel social debido a que no es invasivo para el cliente, no coloca en riesgo la integridad física de los usuarios (operadores de sistemas de inyección) y no afecta de manera alguna; por temas de legales, los derechos humanos o derechos ciudadanos.

1.8.4. Viabilidad operativa

El proyecto es viable operativamente, pues realiza un control de temperatura multi-zonas que permite un correcto desempeño del sistema de inyección de plástico. Así mismo,

presentan mejoras en la operación del sistema gracias a la interfaz HMI, la cual permite al usuario un acceso directo y control en base a los valores de referencia de las temperaturas de cada zona.

1.8.5. Alternativas

No existen soluciones en el mercado local para adquirir sistemas de control de temperatura especializados sin incurrir en grandes gastos de inversión por la compra de los mismos.

2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

Se presenta el marco teórico en este capítulo, describiendo brevemente toda la teoría necesaria para el completo entendimiento de la solución planteada. El marco teórico está subdividido en temas independientes que describen uno a uno la teoría de cada sección del diagrama del diagrama de bloques presentado en el ítem 1.7.1 del capítulo uno.

2.1. Micro-computador de placa única (SBC)

De acuerdo con Zhang (2010), una SBC es una computadora que contiene al menos un procesador, memoria RAM, puertos de red, y puede realizar todas las funciones de una PC estándar, pero a diferencia de esta última, no es modular, todas sus partes están impresas en una misma tarjeta. El autor indica además que las SBC pueden ser usadas para control de procesos industriales o como una tarjeta *plug-in* de interfaz E/S (entradas y salidas) y ser insertada a otros sistemas. Este tipo de computadoras son usadas actualmente en sistemas embebidos, y las más comerciales y disponibles son BeagleBone, Raspberry Pi, Banana Pi y Cubieboard (Pajankar, 2015). Las características más utilizadas de la SBC se describen a continuación.

Linux Embebido

Linux embebido (*embedded Linux*) se refiere al uso del sistema operativo en un dispositivo embebido, como móviles, *routers*, SBC, u otros. Beaglebone Black es un SBC que contiene instalado por defecto el sistema operativo Debian GNU/Linux, el cual es desarrollado por miles de colaboradores en el mundo a través de internet.

Acceso a un SBC

Existen tres medios físicos utilizados para establecer comunicación con un SBC BeagleBone Black (BBB): Serial por USB, USB a TTL, o conexión en red (*Ethernet*). Para las dos primeras opciones, la conexión es a la PC, por lo que es necesario primero instalar los *drivers* del SBC. El medio físico interfaz más utilizado es el puerto hembra mini-USB del BBB, el cual usa el su propio servidor SSH, y, mediante un cliente SSH remoto (ejm. Putty desde una PC), es posible acceder hacia él.

Interfaces de Entrada y Salida

Las entradas y salidas (E/S) más usadas de un SBC BeagleBone Black son las cabeceras (*headers*) P8 y P9, las cuales contienen en total noventa y dos pines que pueden ser utilizados

en diferentes modos de interfaz: GPIO, ADC, Buses de Comunicación, *Enhanced GPIO*, y otros. La Figura 2.1 muestra gráficamente la ubicación de las cabeceras del BBB y la configuración de pines por defecto, la Figura 7.5 y la Figura 7.6 del anexo muestran todos los tipos de configuración disponibles para todos los pines.

P9			P8		
Name			Name		Name
GND	P9_01		GND	P8_01	P8_02 GND
DC_3.3V	P9_03		GPIO1_6	P8_03	P8_04 GPIO1_7
VDD_5V	P9_05		GPIO1_2	P8_05	P8_06 GPIO1_3
SYS_5V	P9_07		TIMER4	P8_07	P8_08 TIMER7
PWR_BUTTON	P9_09		TIMER5	P8_09	P8_10 TIMER6
UART4_RXD	P9_11		GPIO1_13	P8_11	P8_12 GPIO1_12
UART4_TXD	P9_13		EHRPWM2B	P8_13	P8_14 GPIO0_26
GPIO1_16	P9_15		GPIO1_15	P8_15	P8_16 GPIO1_14
I2C1_SCL	P9_17		GPIO0_27	P8_17	P8_18 GPIO2_1
I2C2_SCL	P9_19		EHRPWM2A	P8_19	P8_20 GPIO1_31
UART2_TXD	P9_21		GPIO1_30	P8_21	P8_22 GPIO1_5
GPIO1_17	P9_23		GPIO1_4	P8_23	P8_24 GPIO1_1
GPIO3_21	P9_25		GPIO1_0	P8_25	P8_26 GPIO1_29
GPIO3_19	P9_27		GPIO2_22	P8_27	P8_28 GPIO2_24
SPI1_D0	P9_29		GPIO2_23	P8_29	P8_30 GPIO2_25
SPI1_SCLK	P9_31		UART5_CTSN	P8_31	P8_32 UART5_RTSN
AIN4	P9_33		UART4_RTSN	P8_33	P8_34 UART3_RTSN
AIN6	P9_35		UART4_CTSN	P8_35	P8_36 UART3_CTSN
AIN2	P9_37		UART5_TXD	P8_37	P8_38 UART5_RXD
AIN0	P9_39		GPIO2_12	P8_39	P8_40 GPIO2_13
GPIO3_20	P9_41		GPIO2_10	P8_41	P8_42 GPIO2_11
GND	P9_43		GPIO2_8	P8_43	P8_44 GPIO2_9
GND	P9_45		GPIO2_6	P8_45	P8_46 GPIO2_7

Figura 2.1. Las cabeceras P8 y P9 del BBB y la funcionalidad por defecto de sus pines, del libro *Exploring BeagleBone Tools and Techniques for Building with Embedded Linux*, por Molloy, 2019

Unidades programables de tiempo real (PRUs)

La línea principal de Linux (*mainline Linux* o *Host*) es un sistema operativo no preventivo⁸, lo que significa que no puede soportar procesamiento o ejecución de tareas a tiempo real. Sin embargo, según Texas Instrument (2018), algunos procesadores ARM tienen en su interior otros núcleos llamados PRUs que forman parte de un sistema independiente que les permite realizar procesamiento a tiempo real. De esta forma, una parte o sección del SBC se convierte en un hardware a tiempo real.

El BeagleBone Black tiene dos unidades programables a tiempo real (PRUs) las cuales permiten realizar procesamiento a tiempo real mediante hardware a esta SBC. Texas Instrument (2018) indica que el procesador AM335x del Beaglebone Black contiene dos núcleos de 200MHz que son gobernados por el subsistema PRU-ICSS (*Programmable Real-*

⁸ Los sistemas preventivos (*preemptive*) organizan la ejecución de sus tareas según la prioridad de los mismos, siendo las tareas de mayor prioridad las que siempre se ejecutan en el momento requerido inclusive con la potestad de interrumpir a las tareas con menor prioridad.

Time Unit and Industrial Communication Subsystem). Como se mencionó anteriormente, este subsistema es independiente del *host* Linux, sin embargo, las PRUs pueden interactuar con el mismo mediante:

- Compartimiento de memoria. Cada PRU tiene una memoria local independiente de 8kB, además de una compartida que les permite compartir información entre ambas. Todas estas secciones se encuentran también en una memoria global, contenidas dentro del *host*, es de esta forma que las tres particiones pueden compartir información.
- Interacción entre PRUs. Ambas PRUs son independientes del *host* y entre sí, sin embargo, estos tres sectores pueden compartir memoria entre todas.
- Registros. Cada PRU tiene 32 registros de 32bits, los cuales son usados para acceder a la información de forma más rápida. Estos pueden ser administrados por *bits*, *bytes*, *words*, etc.
- Compartimiento de E/S. Las E/S mejoradas (*enhanced GPIO*) son configuraciones de los pines de los slots P8 y P9, los cuales permiten interconectar a estos con la programación a tiempo real realizada por las PRUs.

El ciclo de trabajo del código ejecutado en las PRUs es independiente los que se estén ejecutando en el sistema principal (*mainline* Linux), sin embargo, es usual que exista interacción entre ellos. El ciclo de ejecución en interacción entre una PRU y el sistema principal (*host*) es como se muestra en la Figura 2.2

Figura 2.2. Ciclo de ejecución en interacción entre el *mainline* Linux y una PRU, del libro *Exploring BeagleBone Tools and Techniques for Building with Embedded Linux*, por Molloy, 2019

De esta forma, según el diagrama anterior, el código de procesamiento real debe ser previamente desarrollado en lenguaje ensamblador y posteriormente compilado en código binario para que la PRU pueda ejecutarlo. En una sección del código principal en el *mainline*

(que puede ser en lenguaje C según el diagrama) ordena ejecutar el programa que yace en la PRU, al mismo tiempo intercambia información mediante la memoria compartida.

2.2. El ADC Sigma-Delta (Conversor Análogo Digital Sigma-Delta)

El conversor digital-analógico Sigma-Delta es un ADC en formato PCM basado en super-muestreo (frecuencia de muestreo f_s superior a la de Nyquist). Los ADC basados en super-muestreo aumentan la relación señal ruido (SNR), reduciendo el número de bits efectivos (ENOB) por muestra y en consecuencia el número de niveles de cuantización. Otra de las ventajas de usar este conversor es que se caracteriza por ser menos propenso al ruido de cuantización, pues la potencia de este último se dispersa en toda la banda de la señal⁹.

Un ADC Sigma-Delta tiene un formato PCM, donde el cuantizador se encuentra dentro del modulador Sigma-Delta (procesamiento analógico conformado por un DAC e integradores), y la salida de este se encuentra un decimador. La relación entre la frecuencia del modulador y la velocidad de datos de salida se denomina relación de super-muestreo (OSR). Para reducir el ruido del ADC, se puede aumentar la OSR mediante la reducción de la velocidad de datos de salida, de esta manera se promedian más muestras del modulador interno para obtener un mejor resultado de conversión. El aumento de la ganancia también reduce el ruido, siendo de mucha utilidad para la medición de señales de bajo nivel (TI, 2016).

$$ENOB = \frac{\ln \left(\frac{2 \times V_{ref}/Ganancia}{V_{rms_Ruido}} \right)}{\ln(2)} \quad (2.1)$$

$$blr = \frac{\ln \left(\frac{2 \times Vin_{max}/Ganancia}{V_{pp_Ruido}} \right)}{\ln(2)} \quad (2.2)$$

ENOB: Número de bits efectivos

blr: Bits libres de ruido

V_{ref} : Voltaje de referencia del ADC

Vin_{max} : Voltaje máximo de entrada ADC

Ganancia : Ganancia de amplificación del PGA¹⁰ del ADC

⁹ En ancho de banda de una señal súper-muestreada tiene mayor longitud y puede dispersar más la potencia de ruido de cuantización.

¹⁰ Amplificador de ganancia programable

$V_{rms_{Ruido}}, V_{pp_{Ruido}}$: Amplitud de ruido rms y pico pico (respectivamente)

Texas Instrument (2016) define el ENOB (número de bits efectivos del convertidor A/D) y el número de bits libres de ruido de su ADC Sigma-Delta ADS1220 en las ecuaciones (2.1) y (2.2). En cierta forma, el número de bits efectivos y libres de ruidos aumentan cuando la ganancia del PGA del ADC aumenta, y disminuyen cuando la amplitud del ruido es mayor (el ruido aumenta si la velocidad de muestreo aumenta). Esto se muestra en las tablas de cálculo de ruidos del conversor en mención. Se presenta a en la Tabla 2.1 una sección de la tabla completa de cálculo de ruido de este ADC para el caso de uso del PGA.

Tabla 2.1

Cálculo de ruido en μV según la ganancia y SPS configurados en ADC ADS1220 (Frecuencia normal del modulador del $\Delta\Sigma$)

Velocidad de datos en muestras por segundo	Ganancia (PGA interno habilitado)							
	8		16		32		64	
	μV_{rms}	μV_{pp}	μV_{rms}	μV_{pp}	μV_{rms}	μV_{pp}	μV_{rms}	μV_{pp}
20	0.8	-3.36	0.35	-1.16	0.23	-0.73	0.1	-0.35
45	0.88	-4.06	0.5	-2.26	0.29	-1.49	0.19	-0.82
90	1.51	-6.65	0.65	-3.62	0.42	-2.14	0.27	-1.22
175	1.82	-11.2	1.01	-5.13	0.57	-3.09	0.34	-2.14
330	2.68	-14.13	1.45	-7.52	0.79	-4.66	0.5	-2.69
600	3.66	-19.26	2.1	-12.77	1.14	-6.87	0.7	-4.76
1000	5.37	-31.52	2.95	-18.08	1.65	-10.71	1.03	-6.52

Nota: Se ha tomado los valores de los rangos a utilizar en el capítulo 3 para la descripción del diseño desarrollado. Adaptado de la hoja técnica *ADS1220 4-Channel, 2-kSPS, Low-Power, 24-Bit ADC with Integrated PGA and Reference*, por TI, 2016.

Por otro lado, la resolución de todo conversor analógico-digital (ADC) se determina con la ecuación (2.3) .

$$r = \frac{\log\left(\frac{\text{rango}}{\text{res}}\right)}{\log 2} \quad (2.3)$$

r: Numero de bits del ADC

rango: Rango de medicion de temperatura

res: Resolucion del ADC

2.3. Filtro Pasa-bajas de Primer Grado

El filtro pasa bajas de primer grado es el circuito eléctrico conformado por un componente resistor y un capacitor, el cual cumple la función de filtrar las señales superiores a la frecuencia de corte f_c configurada en el diseño y dejar pasar a las inferiores de la misma.

$$H_{RC}(s) = \frac{1}{sRC + 1} \quad (2.4)$$

$$f_c [Hz] = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.5)$$

$H_{RC}(s)$: Funcion de transferencia dependiente de la variable s

f_c : Frecuencia de corte en Hz

R y C : Valor de resistencia [Ohm] y capacitor [F]

La función transferencia de este tipo de filtros se presenta a en la ecuación (2.4) y la frecuencia de corte del circuito pasa bajas se obtiene con la ecuación (2.5). Una ecuación importante en filtros es la ecuación de Johnson-Nyquist del ruido de resistencias o ruido térmico de filtro (2.6), el cual aplica a cualquier tipo de medio conductor que transporte electrones:

$$V_n = \sqrt{4KTR\Delta f} \quad (2.6)$$

K : Constante con valor $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

T : Temperatura ambiente en °K (298)

R : Valor de resistencia en Ohms

Δf : Ancho de banda del ruido

2.4. Control Difuso

La lógica difusa es una teoría surgida en los setentas con fines diversos al de control e ingeniería. Hoy en día la lógica difusa es muy utilizada en el campo de la ingeniería de control, un ejemplo local, es en la minería del país, donde grandes empresas como AllenBradley y ABB utilizan algoritmos y funciones de lógica difusa para el control, por ejemplo, de la alimentación de molinos de bolas de las plantas concentradoras. De esta

forma, al igual que los controles clásicos como el PID, un bloque de función Fuzzy puede cerrar el lazo de control de una planta o sistema¹¹ (ver Figura 2.3).

Figura 2.3. Diagrama de bloques de lazo de control difuso para un sistema o planta general, adaptado de del libro *Enfoque práctico de control moderno Con Aplicaciones en Matlab*, por Arnáez, 2014.

Este tipo de control es muy usado ya que “es una de las herramientas de la inteligencia artificial que utiliza la experiencia del operador en el conocimiento de un sistema para generar razonamiento que plasme su comportamiento muy aproximado” (Arnaez, 2014, p. 270). El algoritmo del sistema de control difuso tiene los siguientes pasos según la Figura 2.4:

Figura 2.4. Algoritmo del sistema de control difuso, del libro *Enfoque práctico de control moderno Con Aplicaciones en Matlab*, por Arnáez, 2014.

Normalización y De-normalización

La normalización es el primer paso del algoritmo y consiste en escalar los valores de la entrada del sistema a un rango/escala deseado. La de-normalización es el último paso del

¹¹ Para el caso de esta tesis, la planta representa las resistencias calefactoras ubicadas dentro del molde de sistema de canal caliente. Este control es independiente del control de temperatura y movimientos de la máquina inyectora. Las máquinas inyectoras tienen su propio controlador incorporado (hardware y software).

algoritmo, es el proceso inverso al de la normalización y se realiza luego de la defusificación.

Fusificación

Consiste en hallar; en base a la función de membresía (ejm. Figura 2.5), los grados de membresía (valores difusos, eje " u_x " de la función) a partir de los valores del universo de discursión (valor crisp, eje " x " de la función). La función de membresía de una variable lingüística (ejm. velocidad, temperatura, error de temperatura) está dada a partir de los conjuntos difusos, los mismos que han sido nombrados con términos lingüísticos (ejm. Baja, Media, Alta).

Figura 2.5. Ejemplo de función de membresía de la variable lingüística velocidad, adaptado del libro *Enfoque práctico de control moderno Con Aplicaciones en Matlab*, por Arnáez, 2014

Procesamiento o razonamiento

El procesamiento está basado en las reglas difusas en forma de matriz, operación conocida como FAM (*Fuzzy Associative Memory*), el cual relaciona todos los conjuntos difusos de cada par¹² de variables lingüísticas dentro de una tabla (ver ejemplo en Figura 2.6).

¹² Las FAM solo pueden tener dos dimensiones (2 variables lingüísticas), si existen más de dos, debe crearse una FAM por cada combinación entre dos variables.

Temp \ Vel	R	L	P
C	Neg	Zero	Pos
M	Zero	Zero	Pos
F	Pos	Pos	Pos

Figura 2.6. Ejemplo de FAM para las variables lingüísticas de temperatura y velocidad.
(Elaboración propia)

Como puede apreciarse en la figura anterior, los resultados de la tabla son también conjuntos difusos (del ejemplo: Neg, Zero, Pos), y estos pertenecen a la variable lingüística de salida. Es aquí donde se aplican más los conocimientos del operador del sistema y se plasman en el algoritmo de control mediante las reglas difusas. Estas reglas difusas se basan en condiciones “*IF - THEN*”, así tenemos por ejemplo para la FAM anterior de la Figura 2.6 la siguiente regla difusa: “*IF* la temperatura es Caliente *AND* la velocidad es Lento *THEN* Zero de potencia del *heater*” (Arnáez, 2014).

De-fusificación

Consiste en realizar el proceso inverso al de la fusificación, de manera que, ahora se deben hallar los valores del universo de discursión (valor *crisp*) a partir de los grados de membresía (valores difusos)¹³. Existen diversos métodos de de-fusificación, pero el más usado y potente es el método de centroide, que es llamado también centro de área, centro de gravedad o método de Sugeno (Arnáez, 2014). El cálculo del centroide responde a la ecuación (2.7):

$$z^* = \int \frac{u_z z dz}{u_z dz} \quad (2.7)$$

z^* : *valor centroide*

u_z : *valor difuso*

z : *Valor crisp*

2.5. El sensor de temperatura: El termopar

El termopar o termocupla es un sensor de temperatura el cual se basa en el efecto Seebeck, efecto que consiste en la generación de corriente eléctrica en un circuito cerrado formado por dos metales diferentes (generación de un diferencial de potencial entre ambos metales)

¹³ Esto también se realiza con la función de membresía.

cuyas uniones se mantienen a distinta temperatura. Este tipo de sensor es muy usado debido a su reducido costo y amplio rango de medición.

La función polinómica que permite hallar el voltaje en una termocupla presentada en la ecuación (2.8) y es aplicable para todas las termocuplas a excepción de la termocupla tipo K, para esta última existe la ecuación (2.9).

$$V_{TC} [mV] = \sum_{i=0}^n b_i \times T^i \quad (2.8)$$

$$V_{TC} [mV] = \sum_{i=0}^n a_i \times T^i + a_0 \times e^{a_1 \times (T-a_2)^2} \quad (2.9)$$

$V_{TC}[mV]$: *Voltaje de termocupla en mV*

b_i : *coeficiente de termocupla (valor depende de i)*

T_i : *Valor de temperatura (valor depende de i)*

Esta ecuación polinómica se vuelve más precisa si el orden de la ecuación es mayor, y es usual el uso de la misma para el desarrollo de una tabla de temperaturas (ecuación inversa), calculadas a través de los diferentes niveles de tensión. En ese caso la ecuación se convierte como la de a continuación:

$$T_{TC} [^{\circ}C] = \sum_{i=0}^n a_i \times V_{TC} [mV]^i \quad (2.10)$$

a_i : *coeficiente de termocupla (valor depende de i)*

$T_{TC}[^{\circ}C]$: *Temperatura de termocupla en $^{\circ}C$*

Para desarrollar la tabla de temperaturas a partir de la ecuación (2.10) es necesario contar con los coeficientes “ a_i ” los cuales variarán según el tipo de termopar que se quiera modelar. Para el caso de los termopares tipo J, en la Tabla 2.2 se muestra la tabla de coeficientes según el instituto National Institute of Standards and Technology (NIST) de Estados Unidos. El grafico de curvas características de todas las termocuplas se presentan en la Figura 2.7, donde se observa por ejemplo que la termocupla tipo J tiene un rango de medición de 0 a 40mV para temperaturas positivas desde 0 a 750 $^{\circ}C$.

Tabla 2.2

Tabla de coeficientes inversos de termopar J

Coeficientes inversos para termopar J	
Rango: 0 – 42.919 mV	
a0	0.000000E+00
a1	1.978425E+01
a2	-2.001204E-01
a3	1.036969E-02
a4	-2.549687E-04
a5	3.585153E-06
a6	-5.344285E-08
a7	5.099890E-10
a8	0

Nota: Se ha tomado los coeficientes de conversión inversa del termopar J para un rango de 0 a 760 °C. Adaptado de página web <https://srdata.nist.gov/its90/main/>, por NIST, 2018.

Figura 2.7. Curvas características de las termocuplas °C vs mV, adaptado del artículo Thermocouple Analog Front End (AFE) Using RTD and Internal Temperature Sensor of ADS1220 for Cold Junction Compensation (CJC), por Texas Instrument, 2014

2.6. Control de intensidad por ángulo de disparo

El circuito de control de voltaje de una carga por ángulo de disparo es una conexión en serie entre la alimentación (corriente alterna CA), un TRIAC y la carga resistiva a controlar. Uno de los tres terminales del TRIAC (terminal compuerta) es el encargado del control de la conmutación eléctrica activando al TRIAC cada vez que el terminal es energizado. El

circuito puede variar según las conexiones hechas a su terminal compuerta: Circuito de control (activación) de compuerta.

2.6.1. TRIAC

El TRIAC es un dispositivo semiconductor capaz de controlar la intensidad de corriente en una carga, similar al SCR, con la diferencia que este último solo puede dejar pasar corriente en un solo sentido (Timothy, 2006). Rashid (1995), indica que el TRIAC pertenece a la familia de los tiristores, los cuales son dispositivos semiconductores compuestos por cuatro capas (tres uniones PN) con tres terminales: compuerta, ánodo y cátodo. La Figura 2.8 a continuación muestra la composición por capas del tiristor:

Figura 2.8. Grafico del símbolo de un tiristor y de equivalencia de un triac del libro *Electrónica de Potencia*, por Muhammad H. Rashid, 1995

Para Rashid (1995) el TRIAC pertenece a la clase de tiristores de conducción inversa, debido a que su circuito equivalente presenta a dos tiristores en serie (ver Figura 2.8), permitiendo que el flujo de corriente sea positivo y negativo hacia la carga resistiva. En la Figura 2.9 que presenta las formas de onda de la carga resistiva durante la activación del TRIAC en diferentes ángulos de disparo (retardo), y en la ecuación (2.11) se presenta la fórmula de su voltaje rms.

Figura 2.9. Gráfico de formas de onda de voltaje de la carga resistiva con ángulos de disparo de 30 (a) y 120 (b) grados del libro *Electrónica Industrial Moderna*, por Timothy J. Maloney, 2006

$$V_{carga\ rms}(\theta) = \frac{V_{max}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\pi - \theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta} \quad (2.11)$$

$V_{carga\ rms}(\theta)$: Voltaje rms de la carga en funcion del angulo de disparo

V_{max} : Voltaje pico de la funcion sinusoidal

θ : Angulo de disparo

Figura 2.10. Curva de la ecuación (2.11) (izquierda) y rango lineal de curva (derecha) de para un V_{max} de $220\sqrt{2}$ en el rango de 0 a 180 grados (Elaboración propia)

La Figura 2.10 (lado izquierdo) muestra la curva generada por la ecuación (2.11) que, como puede apreciarse, es no lineal, lo que imposibilita la correcta distribución de voltaje para el control del mismo sobre la carga. Una forma de evadir este problema es linealizando la curva mediante la búsqueda de una ecuación lineal. Al lado superior derecho de la ambas graficas (segunda grafica de la Figura 2.10) se encuentra la ecuación linealizada calculada mediante una hoja de cálculo de M. Excel. Es conveniente no usar todo el rango de voltaje (rango

usado de voltaje: 1-95%) y por ende no usar todo rango del ángulo de disparo ($45-135^\circ$) para obtener una mejor linealización de la curva.

Según Maloney (2006), es usual que los TRIACs tengan disparos desiguales en los medios ciclos positivo y negativo debido a retardos; para resolver este problema se añade de un dispositivo de disparo en la compuerta del TRIAC, pues estos dispositivos “suministran un pulso de corriente de compuerta en vez de una corriente de compuerta senoidal” (Maloney, 2006, p. 224). Un método semiconductor es mediante un DIAC (existen también otros dispositivos).

2.7. Protección y aislamiento de circuitos

2.7.1. Opto-acopladores

El uso de opto-acopladores es común para aislar dos circuitos que necesariamente deben trabajar en conjunto, por ello es llamado también optoaislador o aislador acoplado ópticamente. Un opto-acoplador muy usado para circuitos de potencia son los MOC3021, el cual se basa en el trabajo de un led emisor de luz y un foto-switch bilateral dentro del mismo encapsulado electrónico. La Figura 2.11 a continuación presenta el esquemático de un opto-acoplador MOC3020 de Texas Instrument.

Figura 2.11. Opto-acoplador MOC3021, adaptado de la hoja técnica *MOC3020 THRU MOC3023 OPTOCOUPPLERS/OPTOISOLATORS*, por TI, 1994

2.7.2. Disipadores de calor

Según Méndez (2016), es común el uso de disipadores térmicos en los diseños electrónicos (y usualmente en electrónica de potencia) que usan dispositivos semiconductores como TRIACs, transistores, MOSFET y reguladores de tensión, que usualmente acumulan calor en sus uniones PN (ver la Figura 2.8 para los transistores). De cierta forma, para protección del dispositivo y del circuito donde es empleado el semiconductor, se tiene que cumplir que

la temperatura de la unión debe ser menor a la máxima indicada por el fabricante, según la ecuación (2.12).

$$T_j \leq T_{jmax} - T_a = wd (R_{jc} + R_{cd} + R_{da}) \quad (2.12)$$

$$R_{da} \leq \frac{T_j - T_a}{wd} - R_{jc} - R_{cd} \quad (2.13)$$

T_j : temperatura de la unión

T_{jmax} : temperatura máxima de la unión segun fabricante

T_a : temperatura del ambiente

wd : potencia dicipada por semiconductor

R_{ja} : suma de las resistencias térmicas existentes entre la unión y el ambiente

R_{jc} : resistencia térmica entre la unión y la cápsula del semiconductor

R_{cd} : resistencia térmica entre la cápsula del semiconductor y el disipador

R_{da} : resistencia térmica del disipador

La ecuación (2.13) indica que el límite máximo de la resistencia térmica del disipador referente a las otras resistencias térmicas, temperaturas y potencias en el lugar.

2.8. Resistencia calefactora

Existen diferentes tipos de resistencias calefactoras para distintos tipos de aplicación. En un aspecto general la resistencia calefactora responde ante un estímulo eléctrico (voltaje o corriente) y genera energía en forma de calor. Las resistencias se clasifican según su composición: metálicas, no metálicas, tubos radiantes y resistencias blindadas. La resistencia calefactora metálica de aleación Ni-Cr tiene un amplio uso en industria debido a su bajo costo y su gran maleabilidad; esta puede, además, presentarse en distintas geometrías dependiendo de su aplicación: helicoidales, rectangulares, cilíndricas, en forma de varillas o placas, etc. En la Figura 2.12 se muestra a la resistencia aislada eléctricamente con magnesio, esto se debe a que el ambiente en el cual trabajara es altamente conductivo.

Figura 2.12. Resistencia calefactora metálica helicoidal, por www.euroheaters.com, 2019

El valor resistivo, las dimensiones y la forma de las termo-resistencias varían dependiendo del diseño del molde de inyección con sistema de canal caliente, y este último es fabricado dependiendo del producto final a inyectar del molde (ejm. vasos de plástico). No se profundizará en el análisis de diseño y construcción de moldes de inyección de plástico debido a que es un tema muy amplio y escapa del objetivo de esta tesis.

Debe mencionarse también que el valor resistivo (en ohm) de las resistencias calefactoras varían dependiendo de la temperatura en la que se encuentra, sin embargo, la variación es en micro ohmios, por lo que se obvia en el diseño ingenieril de control de las misma.

2.9. HMI

El HMI es una interfaz (usualmente un panel) entre el proceso de una planta y el operario, que permite la supervisión y control de un proceso industrial a tiempo real. Los HMI de procesos industriales aportan significado y contexto a los diversos componentes de una planta y otros valores de los parámetros del proceso, “dando de esta forma toda la información del proceso necesaria para controlar desde el panel y lograr la optimización del proceso y de la producción (Wonderware, 2019).

Para Lisama (2008), la interfaz hombre máquina debe proporcionar datos de medición a tiempo real para que permita controlar las variables de un proceso en específico, este, además, debería estar acompañado por un gráfico de tendencias (conteniendo componentes gráficos y numéricos) que permita al operador evaluar el comportamiento de dicha variable. En la actualidad, Wonderware (2019) indica que los modernos HMI apuntan a, primero, que el operador trabaje de forma más eficiente alertándolo cuando existen problemas en el proceso, y segundo, a que la información a mostrarse debe ser específica y la necesaria para los diferentes tipos de usuarios que usan la interfaz y los ayude así en sus respectivas tomas de decisiones.

3. CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE PROPUESTO

3.1. Introducción

En el capítulo se presenta detalladamente la descripción del hardware del proyecto propuesto, los materiales utilizados y el diseño de construcción en base a la teoría expuesta en el marco teórico. El capítulo 3 está subdividido en temas independientes que describen uno a uno cada sección del diagrama de bloques general presentado en el capítulo uno y en la Figura 3.1. La Figura 3.2 presenta un esquemático eléctrico general de las conexiones entre las tarjetas y equipos que componen el controlador desarrollado, sin embargo, el detalle de diseño y conexiones de cada tarjeta desarrollada se describe en el ítem 3.3. La Figura 3.3 presenta el diagrama pictórico del proyecto propuesto mostrando todos sus componentes.

Figura 3.1 Diagrama de Bloques General (Elaboración propia)

DIAGRAMA ELECTRICO GENERAL

Figura 3.2. Esquema eléctrico general del controlador desarrollado (Elaboración propia).

Figura 3.3 Diagrama Pictórico en base al diagrama de bloques general del proyecto propuesto (Elaboración propia).

3.2. Materiales y componentes

Se describen a continuación los materiales y componentes más importantes que se han utilizado en la implementación del hardware para conformar la solución propuesta.

3.2.1. BeagleBone Black

El BeagleBone Black es una SBC de desarrollo que tiene como componente principal un microprocesador de Texas Instrument, el AM335X, el cual cuenta con una arquitectura ARM (De la familia Cortex, arquitectura versión ARMv7-A) con núcleo Cortex-A8. La Figura 3.4 muestra un diagrama de bloques resumido de las partes que componen esta SBC, y los principales usados en el controlador propuesto se describen a continuación:

- Botones de arranque y reinicio del SBC.
- Regulador de voltaje TPS.
- Leds de estado de la tarjeta.
- Bloques de expansión, representan a las cabeceras P8 y P9 mencionados en el marco teórico (periferia del embebido).
- Interfaz Ethernet.

- Memoria MMC que aloja el Sistema Operativo.
- USB Host

*Figura 3.4. Diagrama de bloques del BeagleBone Black, del manual *BeagleBone Black System Reference Manual*, por beagleboard.org, 2014.*

Las razones de elección del SBC BeagleBone Black frente a otras alternativas se resumen en el cuadro comparativo de la Tabla 3.1 a continuación:

Tabla 3.1

Cuadro comparativo de SBCs - Razones de elección del BeagleBone Black

Descripción	BeagleBone Black	Raspberry Pi 2	Siemens CPU1212C
Costo	SBC de bajo costo.	SBC de bajo costo.	PLC de precio muy elevado.
Procesador	ARM 1GHz	ARM 700MHz	2.5 μ s; por instrucción
Arquitectura de CPU	Procesador con arquitectura RISC y PRU-ICSS (<i>Programmable Real-Time Unit and Industrial Communication Subsystem</i>)	La arquitectura RISC permite reducción de calor y energía; y por lo tanto de costos de consumo.	Información no disponible
Procesador de tiempo real embebido	Cuenta con dos PRU (unidades programables a tiempo real), procesadores con núcleos de 32bit a 200MHz. Texas Instrument (2018) indica que las PRUs se encuentran separadas del núcleo del ARM, lo que	N/A	Información no disponible. Sus salidas pueden trabajar a una velocidad máxima de 100KHz.

	permite realizar operaciones totalmente independientes de él y entre sí.		
Uso compartido de memoria interna.	Las PRUs comparten secciones de memoria con el host Linux y entre ellos, lo que permite que no sea necesario una comunicación con procesadores auxiliares para compartir información.	NA	NA
Periferia integrada	<p>El BeagleBone Black provee 92 pines de conexión que pueden ser configurados en diferentes tipos de interfaces:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3 buses I2C. • 2 buses CAN. • 2 buses SPI. • 4 buses UART. • 1 puerto serial. • 4 <i>Timers</i>. 	<p>Cuenta con 40 pines de periferia configurables:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 26 pines GPIO. • 2 buses I2C. • 1 bus SPI • 1 bus UART • 1 PWM 	<p>Los CPU de los PLC tienen periferia por defecto no configurable:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 8 entradas digitales, 4 de ellas pueden ser configuradas para trabajar a alta velocidad. • 6 salidas tipo relé integradas • 2 entradas analógicas. • Conector RJ45 para protocolo PROFINET IO.

	<ul style="list-style-type: none"> • 76 pines GPIO. • 38 pines <i>Enhanced</i> GPIO (Configurados para trabajar con las PRU). • 8 salidas PWM (salidas analógicas). • Entradas analógicas (ADCs 1.8V 12 bit). <p>Texas Instrument (2018) indica que los pines que trabajan con las PRU pueden ser configurados para como interfaz de comunicación de alto nivel a tiempo real (EtherCAT, PROFINET, EtherNet/IP, PROFIBUS, Ethernet Powerlink, Sercos, otros).</p>		
Periferia adicional requerida como	No se requiere más periferia.	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere un procesador a tiempo real que permita interfaz de potencia (8 controles de fase). 	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesaria la compra de salidas especiales para control de potencia regulada, y entradas

parte del CPU para el proyecto			especiales de lectura de termocupla.
Lenguajes disponibles	<ul style="list-style-type: none"> Sobre el host Linux es usual el uso del entorno de desarrollo Eclipse trabajando con lenguajes C, C++, Python, Java, PHP, y otros. El entorno gratuito NotePad++ permite el mismo desempeño. Sobre los procesadores de tiempo real (PRUs) se programa en lenguaje ensamblador. 	Eclipse.	Lenguajes KOP, FUB, SCL en el entorno TIA Portal.
Performance de Periferia	Las PRUs tienen completo acceso a diversas partes del SBC, pines, eventos, memoria global y todos los recursos del sistema. Esto proporciona que todo el hardware y software del BeagleBone Black tenga acciones y respuestas	Básica	De alto nivel.

	rápidas (en tiempo real) (Texas Instrument, 2018).		
Almacenamiento	Almacenamiento embebido de 4GB y con un puerto de tarjetas SD.	1GB (256MB compartidos con la GPU) y un puerto de tarjetas SD.	5MB (4MB integrado)
Escalabilidad del CPU para mejoras del proyecto	La SBC puede soportar el control de 256 lazos de control: Lectura de 256 ADC y control de 256 interfaces de potencia mediante sus 2 SPI o I2C.	Puede soportar 256 lazos con el aumento de interfaces.	Soporta un máximo 3 módulos de comunicación y 8 de señales, no podría trabajar con 256 lazos de control. Es necesario usar un CPU más potente, y una mayor cantidad de módulos de entradas y salidas especiales. Todo esto encarece enormemente la solución.

Nota: Se ha realizado la comparación en diferentes características de tres productos. Adaptado de las diversas hojas técnicas de cada producto, 2019.

Según la Tabla 3.1, se concluye que la SBC BeagleBone Black ha sido seleccionada por, además de su capacidad de procesar a altas velocidades (1GHz), su capacidad de integrar de forma embebida una gran cantidad de periféricas y dos procesadores independientes.

3.2.2. ADS1220

El ADS1220 es un conversor análogo digital de 24 bits de la marca Texas Instrument de bajo consumo en corriente, que tiene la capacidad de programar la tasa de transferencia de datos y la ganancia de entrada (incorporada). Se presenta a en la Figura 3.5 un diagrama de bloques del ADC:

Figura 3.5. Diagrama de bloques del ADC ADS1220, adaptado de la hoja técnica *ADS1220 4-Channel, 2-kSPS, Low-Power, 24-Bit ADC with Integrated PGA and Reference*, por Texas Instruments, 2013.

Las razones de elección del ADC ADS1220 frente a otras alternativas se resumen en el cuadro comparativo de la Tabla 3.2 a continuación:

Tabla 3.2

Cuadro comparativo de ADCs - Razones de elección del ADS1220

Descripción	ADS1220 (TI)	ADS1113 (TI)	MAX6675
Nro. bits de conversión	24bits	16 bits	12 bits
$\Delta\Sigma$ ADC incorporada	Si. Como se indica en el marco teórico, mejorar el SNR a costa de reducir la resolución (el número de bits).	Si	No
Tasas de transferencia de datos	Hasta 2 kSPS	0.8 kSPS	Información no disponible
Comunicación SPI	Si. SPI es elegido como el protocolo de comunicación del proyecto propuesto debido a: <ul style="list-style-type: none"> La exclusividad de transmisión de su arquitectura (Chip Select) 	No. I2C.	Si

	<ul style="list-style-type: none"> • Transmisión a mayor velocidad (hasta 20Mbbs) 		
Ganancia embebida (PGA)	El ADS 1220 cuenta con 8 niveles de amplificación	No	No
Sensor interno	Si. Cuenta con un sensor de temperatura de precisión interno el cual se usa como referencia.	No	No
Consumo	120 uA	150 uA	50000 uA
Tipo de chip	SMD	SMD	DIP
Costo	4.5 USD	2.5USD	2USD
Distribución de venta local	Importación.	Importación	Si

Nota: Se ha realizado la comparación en diferentes características de tres productos. Adaptado de las diversas hojas técnicas de cada producto, 2019.

3.2.3. MOC3021

El MOC3021 es un opto-acoplador con un interruptor (*switch*) bilateral en salida del encapsulado. Este componente electrónico es usado en la etapa de potencia del proyecto para el aislamiento de la etapa de control y la etapa de potencia.

Las razones de elección del opto-acoplador MOC3021 frente a otras alternativas para el diseño de la etapa de potencia son:

- En base a la teoría del ítem 2.7.1 del marco teórico, con la adición de un dispositivo de rompimiento en compuerta del TRIAC, se soluciona el problema de retardo ángulos de disparo desiguales que causan en los medios ciclos positivo o negativo. El *switch* bilateral; componente del opto-acoplador, cumple con las características del dispositivo requerido para la solución del problema.
- Conforme a la teoría del marco teórico, el uso del opto-acoplador permite el aislamiento eléctrico entre la etapa de potencia y de control del proyecto, protegiendo así a esta última de daños eléctricos.

3.2.4. TRIAC BTA316X

Tal como se describe en el capítulo dos, el TRIAC es un componente semiconductor con el que se puede controlar la corriente en una carga. La velocidad con la que puede actuar sobre una carga para el control de la misma; control de voltaje en cada medio ciclo de onda de la red eléctrica (ver Figura 2.9), es la principal razón por la cual este componente es usado en la etapa de potencia del proyecto. El TRIAC en mención está diseñado para soportar hasta 16A (corriente de trabajo continuo), suficiente para trabajar de forma idónea con las resistencias térmicas de muchos moldes con sistema con canal caliente, los cuales que suelen trabajar de entre 1 a 7 amperios.

El TRIAC seleccionado, según su hoja técnica, tienen las siguientes principales características, las cuales se usaron también para la selección del disipador idóneo para el semiconductor:

T_J	junction temperature		-	-	125	°C
V_T	on-state voltage	$I_T = 18\text{ A}$; $T_J = 25\text{ °C}$; Fig. 10	-	1.3	1.5	V
Pin	Symbol	Description	Simplified outline		Graphic symbol	
1	T1	main terminal 1	TO-220F (SOT186A)		sym051	
2	T2	main terminal 2				
3	G	gate				
mb	n.c.	mounting base; isolated				
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
$R_{th(j-h)}$	thermal resistance from junction to heatsink	full cycle or half cycle; with heatsink compound; Fig. 6	-	-	4	K/W
		full cycle or half cycle; without heatsink compound; Fig. 6	-	-	5.5	K/W
$R_{th(j-a)}$	thermal resistance from junction to ambient free air	in free air	-	55	-	K/W

Figura 3.6. Tabla de características principales del semiconductor TRIAC BTA316X, adaptado de la hoja técnica *BTA316X series B, C and E*, por TI, 2017

Figura 3.7. Gráfico de disipación de potencia del semiconductor para las distintas corrientes de trabajo y ángulos de conducción (disparo), por TI, 2017

Se puede apreciar, según la Figura 3.7, que para una carga que conduce 5A como máximo, y el semiconductor trabajando con un ángulo de conducción (disparo) de 180°, este último llega a disipar hasta 5W, lo que indica que “ V_T ” (voltaje entre terminales T1 y T2 del semiconductor) es aproximadamente 1V (menor al voltaje máximo indicado en la tabla de la Figura 3.6).

El resto de valores de las características del TRIAC indicados en tabla de la Figura 3.6 se utilizarán en el diseño del disipador térmico en la sección 3.3.3.

3.2.5. Resistencias térmicas

Como se mencionó anteriormente en el capítulo 2, las resistencias calefactoras utilizadas en los moldes de canal caliente de los sistemas de inyección plástica son de diversas dimensiones, formas y potencia. Actualmente, dentro del molde con sistema de canal caliente utilizado, se hace uso de termo-resistencias de forma helicoidal (*coiler*), todas con potencias de 900W. Estas no pueden seleccionarse debido a que son parte del diseño del molde de inyección, y, por el contrario, el proyecto debe adaptarse al hardware existente.

3.2.6. Termocupla tipo J

Como se indicó anteriormente, se desea que el proyecto tenga; además de escalabilidad, la adaptabilidad de leer distintos tipos de sensores al mismo tiempo. La termocupla tipo J fue seleccionada como instrumento de medición de temperatura de las diversas zonas del molde por los siguientes motivos:

- Está hecha para; como lo indica el marco teórico, aplicaciones de alta precisión.
- El rango de medición es el indicado para el tipo de molde utilizado en este sistema.
- Es el instrumento de medición más usado dentro de los moldes de los sistemas de inyección plástica.

3.2.7. Panel HMI Nextion 10" capacitiva

Las razones de elección del *HMI Nextion Intelligent Series* frente a otras alternativas de interfaz hombre-máquina son:

- Es de bajo costo a comparación de los paneles táctiles HMI de las marcas Siemens, A-B y otros.
- La dimensión es lo suficientemente amplia para poder monitorear visualmente los valores de temperatura de todas las zonas al mismo tiempo (8 zonas).
- La dimensión y alta resolución permiten una correcta visualización de tendencias de las temperaturas de todas las zonas individualmente y al mismo tiempo.
- El software de edición del diseño de las pantallas; Nextion Editor V0.58, es amigable y con variedad de herramientas de desarrollo.

3.3. Diseño e implementación

El diagrama de bloques general de la solución propuesta muestra un lazo de control cerrado que se inicia con el tratamiento de una señal analógica (temperatura) obtenida del calor emitido de las resistencias calefactoras que se ubican dentro de los moldes de inyección. La señal de medición es procesada por un SBC que permite el control de la misma cerrando el lazo mediante la etapa de potencia. La SBC tiene una interfaz de operación: una pantalla táctil HMI.

Se describe a continuación la implementación del hardware de cada etapa del diagrama de bloques general (y también del esquema eléctrico general de la Figura 3.2) que conforman la solución propuesta.

3.3.1. Diseño e implementación del HMI

La etapa HMI del proyecto cumple la función de interfaz física local del proyecto propuesto y el hardware utilizado consta de un panel táctil de gran dimensión (10 pulgadas) de la marca Nextion que se encuentra alimentado con 5V y cableado hacia uno de los UART del Beaglebone para establecer una comunicación serial a 9600 baudios. De esta forma, la pantalla táctil trabaja como la interfaz local entre el operador y el controlador desarrollado.

Para la implementación del medio (físico) de comunicación hacia el BBB se realizó un cableado como se muestra en el diagrama de la Figura 3.8, obteniendo de esta forma un bus SPI de un maestro (BBB) y un esclavo (Pantalla Nextion).

Figura 3.8 Esquemático de conexión entre BBB y pantalla táctil Nextion 10" (Elaboración propia)

En el diseño e implementación de esta etapa se optó por conexión cableada (en lugar de *wireless*) para cumplir con dos objetivos: el de asemejar el diseño al del estado del arte (producto embebido); siendo similar en industria a los tableros de control (conexión PLC y

HMI táctil), y el de evitar la pérdida de comunicación y/o el envío de data errónea al controlador, puesto que es la interfaz local y principal de este último.

Se optó por una pantalla táctil capacitiva debido a las ventajas que ofrece frente al tipo resistivas:

- Solo funcionan con el tacto. No funcionan con otros objetos que no sean los dedos del usuario, esto permite que no existan errores en la operación.
- Más sensible al tacto ligero. A diferencia de la pantalla táctil tipo resistiva, no existe la necesidad de ejercer presión sobre la pantalla, evitando la posibilidad de dañarla con el tiempo.
- Imágenes más nítidas con mejor contraste.
- Más durable.

La configuración y diseño de la interfaz (software); en base a lo argumentado en el marco teórico, se describe en el capítulo 4 de esta tesis.

3.3.2. Implementación en el SBC BeagleBone Black

Esta etapa cumple la función principal de todo el hardware, el integrador. Como puede apreciarse en el diagrama general (Figura 1.12), el BeagleBone Black se encuentra conectado a todas las etapas del proyecto propuesto. El hardware principal del Beaglebone utilizado para la implementación del proyecto son, además de los puertos de alimentación 5V y red Ethernet, los pines ubicados en los slots P8 y P9, puesto que estos pines son utilizados de interfaz para las diversas etapas:

- Comunicación SPI con los dispositivos ADC. Los pines 18, 21 y 22 del *slot* P9 están configurados como los pines CLK, DI y DO del protocolo, y los pines del 11 al 16, 19, 20, 23 y 24 están configurados como CS para cada dispositivo esclavo del bus serial.
- Salidas de ángulo de disparo para etapa de potencia. Del *slot* P8, los pines del 35 al 44 y 46, están configurados como salidas *Enhanced GPIO* para ser enviadas a las etapas de potencia individuales.
- Detección de cruce por cero de red eléctrica. El pin 45 del *slot* P8 es utilizado como entrada *Enhanced GPIO* para detección de los cruces por cero de la red eléctrica 220VAC.

- Interfaz HMI con pantalla LCD. Los pines 37 y 38 del *slot* P8 (configurados como UART) son utilizados como para comunicación serial con la pantalla táctil.

De esta forma, la Figura 3.9 muestra la distribución implementada sobre los pines en las cabeceras P8 y P9 del SBC BeagleBone Black.

Figura 3.9. Esquemático de conexión de BeagleBone Black con etapas aledañas (Elaboración propia)

Sobre el BeagleBone Black se monta una tarjeta de adaptación que interconecta todos los pines del dispositivo según la Figura 3.9, con todas las etapas consecutivas del diagrama de bloques general. Se opta por esta opción con el objetivo de asemejar el diseño al de los mencionados en el estado del arte (producto embebido).

Para que el hardware (cabeceras P8/P9) del BeagleBone Black pueda trabajar correctamente, deben ser configurados previamente por software. La configuración por software de esta periferia se verá en el capítulo 4.

3.3.3. Diseño e implementación de la etapa de potencia

La función de esta etapa consiste en el control de voltaje de carga resistiva por el ángulo de disparo indicado por la etapa de control del BeagleBone Black. Físicamente, consiste en un control digital aislado mediante opto-acoplador, que excita la etapa de potencia que está compuesta principalmente por un TRIAC (modelo BTA316X). La Figura 3.10 muestra el

circuito usado para la etapa de potencia, el cual ha sido desarrollado en una tarjeta electrónica. Este circuito de la etapa de potencia presenta cuatro de los ocho lazos de control, para cuatro (de las ocho) resistencias calefactoras del molde de inyección. Cada lazo de control posee una etapa de sensado y potencia independiente.

Figura 3.10. Esquemático parcial (RACK 1) de circuito de potencia (Elaboración propia)

Las razones por la cual se optó por la implementación de este tipo de control de potencia como solución en lugar de otras alternativas son:

- Se busca cambios no bruscos de temperatura. Este tipo de control de potencia permite; dependiendo también de la velocidad de adquisición de valores de

temperatura de los instrumentos, un control de la intensidad de las cargas (resistencias térmicas) en cada ciclo de onda del suministro eléctrico.

- Como se indica en el marco teórico, una de las desventajas del uso del TRIAC es que puede tener disparos desiguales entre los medios ciclos, sin embargo, se soluciona con el uso de un dispositivo de disparo en la compuerta, por ello el uso del MOC.
- El uso del MOC en el diseño del circuito se debe también a su característica de aislamiento, interconectando ópticamente las etapas de control y potencia de forma segura.
- El dispositivo led del MOC que se conecta con la etapa de control, es ideal para conectarse con los GPIO del BeagleBone, debido a que solo es necesario a una resistencia (“R1” para “IN1” en la Figura 3.10).
- El circuito no presenta *snubber* debido a que la carga es netamente resistiva (resistencia calefactora helicoidal) (TI, 1995).

Como se menciona en el capítulo del marco teórico, se debe usar la parte lineal de la ecuación (2.11) de voltaje rms de la carga, se utiliza solo un rango específico del ángulo disparo del TRIAC. Para ello se realizaron pruebas con resistencias de similar diseño (tipo, resistencia y potencia) obteniendo como resultado graficas como el de la Figura 3.11, que como se puede apreciar tienen la forma sinusoidal del cual se habló en el capítulo del marco teórico.

Figura 3.11. Valores de amplitud Vrms para termo-resistencia controlada a diferentes ángulos de disparo del TRIAC. (Elaboración propia)

Como puede apreciarse en la Figura 3.11, los valores del eje X de la tendencia se encuentran entre 20000 y 10000, esto debido a que han sido escalados del valor del ángulo de disparo

en el microcomputador BeagleBone Black (número de iteración en la PRU). En el capítulo 4 de este libro se explicará esto con más detalle.

Debido a que el circuito de potencia contiene semiconductores TRIAC en su diseño, los cuales disipan calor, es necesario el uso de disipadores térmicos. Se hace uso de las ecuaciones del marco teórico y de los valores de la hoja técnica del semiconductor BTA316X (ver tabla de la Figura 3.6) para el cálculo y selección del disipador idóneo:

$$T_j \leq T_{jmax} - T_a = 125 - 25 = 100^{\circ}C \quad (3.1)$$

T_j: temperatura de la unión

T_{jmax}: temperatura máxima de la unión según fabricante

T_a: temperatura del ambiente

Según la ecuación (3.1) que el diseño debe apuntar a que la temperatura de la unión del semiconductor debe ser menor a 100°C.

De acuerdo a lo calculado en la sección 3.2.4, la potencia disipada por el TRIAC BTA316X, al trabajar con una carga que consume un máximo de 5A, es 5W, y asumiendo que “R_{cd}” es igual a “R_{jc}”, se obtiene:

$$R_{da} \leq \frac{T_j - T_a}{wd} - R_{jc} - R_{cd} = \frac{125 - 25}{5} - 5.5 - 5.5 = 9K/W \quad (3.2)$$

wd : Potencia disipada por semiconductor

R_{ja} : Suma de las resistencias térmicas existentes entre la unión y el ambiente

R_{jc} : Resistencia térmica entre la unión y la cápsula del semiconductor

R_{cd} : Resistencia térmica entre la cápsula del semiconductor y el disipador

R_{da} : Resistencia térmica del disipador

Según lo calculado en la ecuación (3.2), la resistencia térmica del disipador a seleccionar debe ser menor a 9K/W, por tal razón se escogió el modelo comercial SK129635 (ver Figura 3.12), ideal para semiconductores TO220 (modelo de capsula del TRIAC BTA316X), el cual según su hoja técnica posee una resistencia térmica de 4.5K/W.

Figura 3.12. Fotografía del disipador térmico SK129635 (Elaboración Propia).

Un circuito complementario importante para la etapa de potencia es el de detección de cruce por cero. La Figura 3.13 muestra un circuito detector de cruce por cero de onda completa, el cual se compone de un puente diodos en serie con una resistencia de 100Kohm de 1W (diseño que permite la no superación de amperaje máximo del dispositivo continuo) conectado a un opto acoplador MOC3011. Como se mencionó anteriormente, este último dispositivo permite el aislamiento de la corriente alterna de la red de control del controlador desarrollado. La salida entrega pulsos con amplitud de 3.3VDC al BeagleBone Black a una frecuencia de 120Hz, permitiendo un correcto sincronismo de la etapa de potencia del controlador con la red eléctrica.

Figura 3.13. Esquema eléctrico circuito de detección de cruce por cero. (Elaboración propia)

La validación de esta etapa se realizó mediante la comparación del valor teórico de voltaje rms obtenido con cierto ángulo de disparo versus el valor medido de un multímetro Fluke 709. El valor teórico se calcula mediante la fórmula presentada en el marco teórico

$$V_{carga\ rms}(\theta) = \frac{V_{max}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\pi - \theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta} \quad (3.3)$$

$V_{carga\ rms}(\theta)$: Voltaje rms de la carga en funcion del angulo de disparo

V_{max} : Voltaje pico de la funcion sinusoidal

θ : *Angulo de disparo*

Para el presente caso, la alimentación de las resistencias proviene de los 220Vrms de la red eléctrica¹⁴. El voltaje máximo de la red eléctrica es $220\sqrt{2}$ voltios y " θ " es el valor del ángulo en radianes.

Los resultados de las validaciones se muestran el ítem 5.1.5 del capítulo 5.

3.3.4. Uso del sensor termopar

Como se explicó en el ítem 2.6 de este capítulo, el sensor utilizado para cada lazo de control (cada zona) es un termopar tipo J. El sensor cumple la función de instrumento de medición y pertenece a la etapa de sensado del diagrama de bloques general, el cual se ubica dentro de las resistencias calefactoras y es el encargado de llevar la señal analógica a la etapa de acondicionamiento de señal.

En base a la ecuación (2.8) del marco teórico se obtiene una tabla de temperaturas que dependen del potencial en milivoltios del sensor termopar. Esta tabla es generada en un arreglo/vector por software como parte del proceso de digitalización. Este proceso se explicará a detalle en el capítulo 4.

3.3.5. Diseño e implementación de la etapa de acondicionamiento de señal analógica

La etapa de acondicionamiento de señal consiste en el diseño de un filtro pasa-bajas más un filtro *anti-aliasing* que están ubicados secuencialmente luego del sensor termopar (etapa de sensado) y antes del conversor ADC (etapa de digitalización).

3.3.5.1. Diseño del filtro pasa-bajas

El diseño del filtro pasa-bajas de cada sensor contiene dos capacitores de modo diferencial y uno de modo común (ver Figura 3.14), donde el último se diferencia por tener 15 veces el valor de los primeros, esto con la finalidad de reducir el ruido causado por la variación entre sí del valor de los diferenciales¹⁵.

¹⁴ Alimentación de 220 voltios rms en Línea y Neutro.

¹⁵ Los capacitores comerciales tienen una precisión del 10%.

Figura 3.14. Diseño de filtro (capacitores comunes y diferenciales), adaptado del libro *Thermocouple Analog Front End (AFE) Using RTD and Internal Temperature Sensor of ADS1220 for Cold Junction Compensation (CJC)*, por TI, 2014

Haciendo uso de la ecuación (2.5); ecuación de frecuencia de filtro pasa-bajas, en la ecuación (2.6); ecuación del ruido térmico en el filtro, se obtiene simplificando:

$$V_n^2 = \frac{KT}{C} \quad (3.4)$$

V_n : Ruido de resistencia o ruido termico

K : Constante con valor $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

T : Temperatura ambiente en °K (298)

C : Valor de capacitancia

Donde “C” es la suma de la del valor del capacitor diferencial más la mitad del valor del capacitor de modo común, y el ruido térmico del filtro “ V_n ” debe ser menor que al ruido referido de entrada del ADC (0.57uVrms, según la Tabla 2.1¹⁶) para minimizar el ruido resultante. Por lo tanto:

$$V_n < 0.57\mu V \quad (3.5)$$

$$C = C_{dif} + \frac{1}{2}C_{cm} > 0.077\mu F \quad (3.6)$$

V_n : Ruido de resistencia o ruido termico

¹⁶ Con SPS de 175 y PGA 32V/V según lo mencionado posteriormente en la sección 3.3.6

C_{dif} : Capacitancia diferencial

C_{cm} : Capacitancia comun

C : Valor de capacitancia

Los valores comerciales de los capacitores escogidos para el diseño del filtro, que cumplen con la ecuación (3.6), son de 0.27uF (“ C_{cm} ”) y 4.7uF (“ C_{dif} ”), por lo tanto, el ruido térmico “ V_n ” del filtro es 0.029uV.

La frecuencia del modulador del ADC es de 256kHz, la cual debe ser rechazada con 80dB con el objetivo de eliminar el *aliasing*. Considerando que el filtro pasa-bajas puede rechazar 20dB, serán necesarias 4 décadas de magnitud de la función transferencia del filtro pasa-bajas (ecuación (2.4))

$$H_{RC}(jw) = \frac{1}{10000} = \frac{1}{jwR_{dif}C + 1} \quad (3.7)$$

H_{RC} : Funcion transferencia de filtro pasa – bajas

R_{dif} : Valor de resistencia diferencial

C : Valor de capacitancia

Donde “ R_{dif} ” es la resistencia diferencial que resulta de la suma de “ R_{f1} ” y “ R_{f2} ” (ver Figura 3.14), y “ w ” es 2π por 256kHz. Por tal razón, conforme a la ecuación (2.5), las resistencias deben ser mayores a 643ohms. Además de ello se ha considerado; para protección del dispositivo ADS1220, que el valor de estas resistencias debe ser mayor que la división entre el máximo voltaje de sobretensión y la máxima corriente permitida en la entrada del ADC¹⁷. Por lo tanto, para limitar la corriente de ingreso al ADC, el valore de estas resistencias deben ser mayor igual a 700 ohm.

Considerando la precisión de los componentes comerciales (1% resistencias, 10% capacitancias), se ha seleccionado los valores de 1Kohm para así no elevar por demás la imprecisión entre las mismas (20ohm de imprecisión máxima entre “ R_{f1} ” y “ R_{f2} ” a 1Kohm), la cual causa ya una caída de potencial de hasta 12uV que alteran gravemente la medición del ADC¹⁸ (Variación en voltaje común “VCM”). Con las resistencias

¹⁷ Según la hoja técnica del ADS1220, los valores son 7V y 10mA respectivamente.

¹⁸ Se ha utilizado resistencias bias de 2Mohm para atenuar este error al mínimo.

seleccionadas, y considerando que la impedancia diferencial de entrada del ADS1220 es 10Mohm, el error del filtro se calcula de la siguiente forma:

$$Error \% = \frac{R_{dif}}{R_{dif} + Input_Z} = \frac{1Kohm}{1Kohm + 10Mohm} = 0.02\% \quad (3.8)$$

Para la termocupla seleccionada (tipo J), conforme al marco teórico, su rango positivo de lectura es de 0 a 40mV (0-750°C), por lo que, según ecuación (3.8), un error de 0.02% en el filtro genera un máximo de 8uV de error en la lectura del ADC cuando la temperatura leída es la máxima suministrada por el sensor. Este error máximo se refleja en 0.13°C de error cuando la termocupla mide 750°C. Para una termocupla tipo K (con voltaje de medición máximo de 54mV) existe un error de medición de 11uV, que son 0.199°C cuando la termocupla mide 1250°C.

En el sistema de digitalización diseñado, el filtro es el grupo de componentes que más milivoltios de error introduce, por lo que se obvia la sumatoria de errores y se asume a este como el error máximo introducido al sistema. La Figura 3.15 muestra el esquemático del circuito de filtro, el cual forma parte de una tarjeta ADC.

Figura 3.15. Esquemático de circuito de filtro de 1 ADC, parte de una tarjeta ADC. (Elaboración propia)

3.3.6. Diseño e implementación de la etapa de digitalización (ADC)

El diseño de la etapa de digitalización parte de la correcta selección del ADC, y para ello se inicia con el cálculo del número de bits efectivos (ENOB) que el convertidor; a una resolución de 0.1 grados Celcius, digitalizará la señal analógica del sensor termopar seleccionado. Como se observa en la Figura 2.7 del ítem 2.5 del marco teórico, el termopar tipo J puede medir de 0 hasta 700 grados Celsius, y el tipo K de -200 a 1300°C; se hace uso de la ecuación (2.3) del capítulo del marco teórico para el cálculo del número de bits necesarios para digitalizar un sensor termocupla tipo J:

$$r_{tipo J} = \frac{\log\left(\frac{700 - 0}{0.1}\right)}{\log 2} = 12.9 \text{ bits} \quad (3.9)$$

$$r_{tipo K} = \frac{\log\left(\frac{1300 + 200}{0.1}\right)}{\log 2} = 13.9 \text{ bits} \quad (3.10)$$

$r_{tipo J}$: Número de bits caso termocupla tipo J

$r_{tipo K}$: Número de bits caso termocupla tipo K

Como se mencionó en el marco teórico, el ADC ADS1220 cuenta con un amplificador programable (mediante registros) dentro del encapsulado, la ganancia a establecer en el mismo se calcula mediante la división del voltaje de referencia interno (2.048V según hoja técnica y diseño) sobre el valor máximo de voltaje de la termocupla (40mv para tipo J), resultando 51.2V/V, por lo que, por protección de saturación del conversor, según la Tabla 2.1, se selecciona 32V/V por ser el valor inmediato menor disponible para configuración.

Seleccionado el valor de configuración de la ganancia, con un SPS de 175, se hace uso de la ecuación (2.2) del marco teórico para el cálculo de bits libres de ruido del ADC:

$$blr = \frac{\ln\left(\frac{2 \times Vin_{max}/Ganancia}{V_{ppRuido}}\right)}{\ln(2)} = \frac{\ln\left(\frac{2 \times 2.048V/32V/V}{3.09\mu V}\right)}{\ln(2)} = 15.34 \quad (3.11)$$

blr : Bits libres de ruido

Vin_{max} : Voltaje máximo de entrada ADC

Ganancia : Ganancia de amplificación del PGA del ADC

$V_{ppRuido}$: Amplitud de ruido pico pico

La ecuación (3.11) indica que el sistema de adquisición del ADC ADS1220 logra 15 bits de lectura sin ruido. Por otro lado, según lo calculado en la sección 3.6 de este capítulo, el filtro diseñado ingresa hasta 8uV de error cuando la temperatura leída de la termocupla es la máxima. Sin embargo, a 250°C; temperatura de trabajo promedio de las termo-resistencias para el molde de canal caliente utilizado, el voltaje promedio en la termocupla es de 17mV, por lo que el error de 0.02% llega a un máximo de 3.4uV, reflejados en 0.059°C de error en la medición.

Por tal razón, los bits sin error para el ADC ADS1220, para la medida de una termocupla tipo J (0-750), según la ecuación (2.3) son 14 bits. Realizando el mismo cálculo para una termocupla tipo K, los bits necesarios para una resolución de 0.058°C (resolución máxima a 250°C con 2.4uV de error de filtro), son necesarios 15 bits. De esta forma se cumple que el ADC ADS1220 haya sido correctamente seleccionado. La implementación de esta etapa se presenta en la Figura 3.16, el cual muestra el esquemático del ADC utilizado, y en la Figura 3.17 que presenta el esquemático del bus SPI utilizado como rack para 8 tarjetas ADC+Filtro.

Figura 3.16 Esquemático de circuito ADC, parte de una tarjeta ADC. (Elaboración propia)

Figura 3.17. Esquemático bus SPI. (Elaboracion propia)

En el trayecto del desarrollo del producto se encontraron problemas que se debieron al hardware:

- Mala elaboración de la tarjeta electrónica. La cobertura/recubrimiento de protección de la tarjeta muchas veces cubre parte de las pistas de cobre. Este mal desarrollo de tarjeta se vuelven graves problemas en tarjetas que usan chips SMD.
- Mal soldado de componentes. Lamentablemente muchas veces se encontraron errores de soldadura, los cuales en algunos casos dañaron y hasta rompieron las pistas. Este daño es, en algunos casos, difícil de persuadir con la vista, dando a pensar que la mala lectura de la señal se debe a otros motivos (ejm. ruptura o daño de cable termocupla).

El hardware del controlador esta físicamente compuesto por todos los componentes del diagrama pictórico de la Figura 3.3, todo esto se encuentra en el interior del tablero de control fabricado según se muestra en la Figura 1.13 del capítulo 1. Este tablero tiene conectores de 16 pines para conectar los cables de fuerza de las resistencias calefactoras y otro conector igual para la conexión de sus termocuplas. El tablero se alimenta con 220 VAC.

4. CAPÍTULO 4: DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE PROPUESTO

4.1. Introducción

En el siguiente capítulo se describen las partes que componen el software desarrollado para el funcionamiento de la tesis propuesta. Este se encuentra escrito en dos lenguajes, C++ y *Assembler*, los cuales se ejecutan en el *Host* de Linux y la PRU respectivamente. El código que se ejecuta en el *Host* de Linux permite unificar los periféricos utilizados (etapa de adquisición, etapa de potencia y HMI) y al mismo tiempo realiza los controladores difusos. En la PRU se encuentra el código que se emplea para modificar los ángulos de disparo de la etapa de potencia. Por otro lado, para la interacción entre el usuario y el controlador se diseñó un GUIDE utilizando el programa Nextion Editor V0.58 el cual es proporcionado gratuitamente por la compañía que fabrica la pantalla táctil utilizada en este proyecto.

4.2. Diseño e implementación

El diagrama de bloques general de programación como parte de la solución propuesta se muestra en la Figura 4.1, en ella se puede apreciar que el código implementado se encuentra ubicado en tres zonas físicas: Panel táctil, SBC y PRU del SBC. El código principal se ejecuta en el Host de Linux dentro del SBC, este permite, además de la vinculación a la periferia (etapa de adquisición, etapa de potencia y HMI del Diagrama de Bloques General), la comunicación e intercomunicación con los otros dos hardware de programación.

Figura 4.1. Diagrama de Bloques General de Programación (Elaboración Propia)

Se describe a continuación la implementación del software de cada etapa del diagrama de bloques general de programación.

Host de Linux

4.2.1. Inicialización de sistema

Esta etapa cumple la función de configuración previa de la SBC, la cual prepara las periféricas de las cabeceras P8 y P9 del BeagleBone Black. Para poder utilizar los periféricos que intervienen en este proyecto es necesario realizar la configuración previa en el BBB, la cual permitirá la conexión entre las diversas etapas de hardware del controlador desarrollado. Como se menciona en el marco teórico y a detalle en la sección de Apéndices, el BeagleBone Black tiene una gran cantidad de entradas y salidas (E/S) las cuales necesitan ser configurados de acuerdo al uso requerido.

Cabe resaltar que cada una de estas E/S tiene siete modos de operación, lo cual le da una versatilidad única a este SBC. Para este caso, la asignación de E/S del BBB a utilizar y el modo en las que estas operan se define en el ítem 3.3.2 del libro, según la Figura 3.9.

Figura 4.2. Diagrama de Bloques de Software - Inicialización del Sistema. (Elaboración Propia)

La Figura 4.2 muestra un diagrama de bloques que indica la secuencia de lo descrito anteriormente: ejecución de configuración inicial del sistema en el host de Linux. Como se menciona en el marco teórico, el BeagleBone Black tiene instalado por defecto el sistema operativo Debian basado en Linux, el cual permite el correcto funcionamiento del SBC. El

programa principal que se ejecuta en el Host de Linux (*mainline*) se ha elaborado en lenguaje C++ con ayuda del compilador libre Notepad C++.

4.2.2. Adquisición de datos.

Esta etapa cumple la función de adquisición de las señales de los termopares a través del protocolo SPI y su posterior tratamiento las mismas para una correcta interpretación del valor medido. El protocolo de comunicación serial SPI ha sido seleccionado como vía de solución en lugar de otras alternativas para el desarrollo del proyecto debido a:

- Permite la exclusividad de transmisión debido a su arquitectura mediante el uso de una línea adicional (selección de esclavo).
- Permite el envío y recepción de datos con una alta velocidad de transmisión mayor (hasta 20Mbbs), superior a los usados por I²C o SMBus.
- Permite un menor consumo de energía a comparación de los otros protocolos mencionados.

En esta etapa se configura el protocolo SPI, el cual es utilizado para realizar la comunicación entre el BeagleBone Black y la etapa de adquisición de temperaturas. El diagrama de bloques de la Figura 4.3 presenta el orden de ejecución del software que permite la configuración del protocolo SPI.

Figura 4.3. Diagrama de Bloques de Software – Adquisición y tratamiento de señales de ADCs.
(Elaboración Propia)

Inicialmente, se configura la comunicación SPI tomando en cuenta las características de hardware de los equipos con los que se comunicaran (modo de comunicación, velocidad de comunicación). Una vez realizado a esto, se procede a configurar las salidas que habilitarán la comunicación del SBC con los dispositivos ADC (habilitación de *chip select*).

Para el inicio de adquisición de datos de los ADC, primero el BeagleBone Black (maestro en el protocolo de comunicación) debe enviar comandos a los esclavos ADCs (ver Figura 3.16) con la finalidad de configurar los parámetros mencionados en el marco teórico. De esta forma se configura las ganancias de conversión, la velocidad de muestreo, el modo de comunicación, la activación de filtro interno, y la activación de sensor de temperatura interno.

Los comandos enviados a los ADC son registros que configuran a los mismos y a la vez son solicitudes de la información. Así la señal de la información enviada desde los ADCs llega al BeagleBone Black en forma digital obteniendo valores en unidad de milivoltios. Estos

deben ser convertidos a los valores de temperatura haciendo uso de la ecuación (2.10) del marco teórico.

Como parte del diseño de software, se realizó el uso de “*look at table*” generando una tabla utilizando la ecuación polinómica (2.10) y los coeficientes inversos del termopar J de la Tabla 2.2 (capítulo del marco teórico sección 2.5). Esto con la finalidad de eliminar el tiempo de cálculo de las temperaturas por cada ciclo. Con ese objetivo, se realizó previamente el cálculo de todas las temperaturas posibles de lectura de tensión de la termocupla tipo J y se almacenaron los datos en un arreglo de valores contenidos dentro de un bloc de notas en el *host* de Linux. El diagrama de flujo de lo comentado se ilustra en la Figura 4.4 a continuación.

Figura 4.4. Diagrama de flujo de programación de la etapa de conversión de valores de ADCs de mV a °C. (Elaboración propia)

4.2.2.1. Validación parcial: Lectura de temperaturas del controlador

Para la validación de esta etapa se utilizó el siguiente equipamiento:

- Laptop DELL Inspiron 15.
- Multímetro Fluke 709.
- Termocuplas tipo J.
- Conector termopar tipo K de multímetro Fluke, usado para validar la medición.
- Recipiente metálico con aceite industrial.
- Soplete de gas y balón de gas metano. Usado como fuente de calor para el recipiente de aceite.
- Partes del controlador desarrollado utilizadas: SBC BeagleBone Black, Tarjetas ADC+filtro.

A continuación, se describe brevemente paso a paso el procedimiento de medición:

Paso 1: Ubicación los equipos y materiales. Dentro del recipiente de aceite, se colocan los termopares J y K, estos deben ubicarse juntos para que puedan tomar la temperatura en el mismo punto de medición. Se coloca las partes del controlador (BeagleBone Black, Tarjetas ADC+filtro) sobre una manta antiestática en una mesa.

Paso 2: Conexión. Se realiza la conexión entre la PC, el BBB, las tarjetas ADC, y la alimentación (220VAC). Las termocuplas tipo J se conectan a las tarjetas ADC del controlador desarrollado.

Paso 3: Inicialización de controlador. Una vez energizado, el BeagleBone Black realiza la adquisición de datos.

Paso 4: Se inicia el calentamiento del recipiente de aceite con el calor suministrado por el soplete (ver Figura 4.5).

Paso 5: Toma de datos de temperatura. Se registran los valores de temperatura medidos por el controlador desarrollado y por el multímetro Fluke mediante su conector de termopar tipo K.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.1, presentando los valores de temperatura de las resistencias obtenidos con el multímetro (valor medido), los valores obtenidos con el controlador desarrollado, y los valores de referencia establecidos desde la PC.

Tabla 4.1

Validación de etapa de adquisición de señales de temperatura mediante los ADC

T. Leído (Controlador desarrollado)	T. Leído real (Multímetro Fluke)	T. Leído (Multímetro Fluke) Offset 0.2°C	Error de medición	% Error
126.12	126.3	126.1	0.02	0.02%
126.17	126.4	126.2	0.03	0.02%
126.2	126.4	126.2	0	0.00%
126.21	126.4	126.2	0.01	0.01%
126.27	126.5	126.3	0.03	0.02%
126.28	126.5	126.3	0.02	0.02%
126.24	126.4	126.2	0.04	0.03%
126.31	126.5	126.3	0.01	0.01%
126.34	126.5	126.3	0.04	0.03%
126.38	126.6	126.4	0.02	0.02%
126.32	126.5	126.3	0.02	0.02%
126.25	126.4	126.2	0.05	0.04%
126.21	126.4	126.2	0.01	0.01%
126.15	126.4	126.2	0.05	0.04%
126.12	126.3	126.1	0.02	0.02%
126.11	126.3	126.1	0.01	0.01%
126.04	126.2	126	0.04	0.03%
126.01	126.2	126	0.01	0.01%
125.95	126.1	125.9	0.05	0.04%

Nota: La información muestra los valores de temperatura obtenidos del controlador desarrollado y del multímetro Fluke durante un tiempo determinado (200 segundos). Elaboración propia.

Se listan a continuación los comentarios y conclusiones de esta etapa del diagrama general respecto a las mediciones presentadas en las tablas del ítem previo:

- En la Tabla 4.1 se observa que el valor medido por el controlador desarrollado difiere del valor medido por el multímetro Fluke (sin *offset*) en un máximo de 0.05°C.
- Se debe considerar que los valores de la columna “T. Leído (Multímetro Fluke)” han sido ingresados a la tabla considerando un *offset* negativo de 0.2°C (la temperatura real medida por el multímetro es mayor por 0.2°C respecto al medido por el equipo desarrollado). Esto se debe a que los termopares de ambos instrumentos no se encuentran exactamente en el mismo punto de medición, como se puede apreciar en la Figura 4.5 , la termocupla usada por el controlador desarrollado está cubierta por un borne de contacto y su tuerca de sujeción.

Figura 4.5 Validación parcial - Lectura de temperaturas del controlador desarrollado referente al medido por multímetro Fluke con termopares en un recinto (Elaboración propia).

- La mínima variación entre los valores de temperatura obtenidos por el controlador y el multímetro se debe a que ambos instrumentos de medición (termopares) se encuentran casi en el mismo punto de medición. Esta variación se ve afectada (aumenta) en decimas si es que los termopares se alejan entre sí.
- La precisión del multímetro Fluke es de 0.1°C y la precisión de lectura de temperatura del controlador desarrollado es de 0.059°C .
- La Tabla 4.1 muestra un cuadro comparativo de medición de temperatura de un solo ADC (1 zona). La validación, sin embargo, se realizó para las 8 zonas.

4.2.3. Controlador difuso.

Esta etapa de software cumple la función más importante de la presente tesis, realizar el cálculo de salidas de potencia que requieren las resistencias térmicas del sistema con canal caliente para el correcto control de temperatura de las mismas. El tipo de control por el cual se optó es el de lógica difusa, y las razones de selección del mismo en lugar de otras alternativas es:

- Proporciona un control robusto que no requiere amplio conocimiento del operador que utiliza el dispositivo.
- Como se menciona en el marco teórico, es un control muy utilizado en el campo de la ingeniería de control, como en la minería del país y por marcas reconocidas como Allen Bradley y ABB.

- La lógica difusa permite implementar un controlador utilizando la experiencia del operador.
- El consumo de recursos computacionales no es elevado, lo que permite ser implementado en el BBB sin utilizar muchos recursos.

De esta forma, basándose en el algoritmo del sistema de control difuso descrito en el marco teórico, el diagrama de bloques de la Figura 4.6 presenta el orden de ejecución del software que permite el completo funcionamiento de esta etapa.

Figura 4.6 Diagrama de Bloques de Software – Control difuso para el cálculo de intensidad de las resistencia calefactoras en base a sus temperaturas. (Elaboración Propia)

Normalización.

Para la etapa de normalización no se ha empleado ningún escalamiento y se ha utilizado los valores reales de las variables de error de temperatura y pendiente.

Fusificación.

Este proceso conlleva la transformación de los valores de error de temperatura y pendiente a valores difusos los cuales podrán ser empleados en la etapa de razonamiento. La función de membresía utilizada para el error de temperatura se muestra en la Figura 4.7. Se ha desarrollado un código en lenguaje C++ capaz de calcular los grados de membresía (valores difusos, eje y) a través de las intersecciones de los conjuntos difusos. Los términos lingüísticos escogidos para los conjuntos difusos son los indicados en la leyenda de la gráfica. Esta gran cantidad de conjuntos permite que el error de control sea mínimo. La ecuación (4.1) es del error de temperatura.

$$eT = Tsp - TActual \quad (4.1)$$

eT : Error de temperatura

Tsp : Temperatura de referencia

TActual : Temperatura leída actualmente en la resistencia termica

Figura 4.7 Función de membresía de la variable lingüística error de temperatura (Elaboración Propia).

La fusificación mediante la función de membresía de la variable lingüística velocidad es similar a la anterior (ver Figura 4.8). El uso de esta segunda función de membresía se debe a que es necesario el control de velocidad de la temperatura para evitar cambios bruscos de temperatura que pudieran dañar al molde y el sistema de inyección en conjunto. Para el caso de la función de membresía Pendiente, esta variable se obtiene haciendo uso de la siguiente función aritmética:

$$Pen = \frac{T_{Actual} - T_{Anterior}}{Ke} \quad (4.2)$$

Pen : Pendiente

T_{Anterior} : Temperatura leída en una iteración (software) anterior

T_{Actual} : Temperatura leída actualmente en la resistencia térmica

Ke : Constante de escalamiento

Figura 4.8 Función de membresía de la variable lingüística pendiente (Elaboración Propia).

La Figura 4.9 muestra un diagrama de flujo de esta etapa del control:

Figura 4.9 Diagrama de flujo de programación de la etapa de fusificación del control difuso (Elaboración propia)

Razonamiento.

El razonamiento para obtener los valores asociados a los valores *crisp* se basa en la FAM diseñada a partir de la experiencia de los usuarios. De esta forma se puede asegurar un

correcto funcionamiento y un calentamiento suave. En la Tabla 4.2 a continuación se muestra la FAM:

Tabla 4.2
Reglas difusas, FAM de control

$\Delta T / \Delta P$	Negativa	Cero	Positiva	Muy Positiva
T. Negativa	B	B	B	B
T. Ok	M	M	B	B
T. Positiva	A	M	M	B
T. Muy Positiva	A	A	M	B

Nota: El cuadro muestra las reglas difusas a partir de las acciones a tomar por el controlador frente a los distintos pares de situaciones (conjuntos difusos).

La Figura 4.10 muestra un diagrama de flujo de esta etapa del control:

Figura 4.10. Diagrama de flujo de programación de la etapa de razonamiento del control difuso (Elaboración propia)

De-fusificación.

Se realiza el algoritmo computacional de la de-fusificación en código C++, en el proceso de de-fusificación se emplea el método de centroide el cual es el mejor método para realizar la de-fusificación. La Figura 4.11 muestra el gráfico de de-fusificación con un corte (línea roja vertical) que indica el valor de salida del controlador difuso para una entrada específica, evaluada según la FAM.

Figura 4.11 De-fusificación con método centroide (Elaboración Propia).

La Figura 4.10 muestra un diagrama de flujo de esta etapa del control:

Figura 4.12. Diagrama de flujo de programación de la etapa de de-fusificación del control difuso (Elaboración propia)

De- normalización.

La de-normalización de los datos obtenidos de la etapa anterior se realiza mediante el escalamiento de los valores de-fusificados (con un rango del 0 al 1) a los valores considerados como ángulos de disparo (en número de iteraciones) en la PRU en el código desarrollado (ver Figura 4.13).

Figura 4.13 De-normalizacion del control difuso (Elaboración propia)

$$\text{Angulo} = -750 (\text{SalidaDefus}) + 100750 \quad (4.3)$$

Angulo : Salida del control difuso escalada en número de iteraciones en la PRU

SalidaDefus : Valor de salida defusificada

Haciendo énfasis a la teoría del marco teórico referente a los ángulos de disparo (ítem 2.6) y a lo desarrollado en el capítulo 3 (ver Figura 3.11), los valores óptimos de la salida de potencia pertenecen al rango lineal de los dispositivos TRIAC. Para ello, se hace uso de la ecuación (4.4) a continuación:

$$V_{out} = -0.0032 (\text{Angulo}) + 3222.39 \quad (4.4)$$

Vout : Voltaje de salida de la etapa de potencia (voltaje e resistencia termica)

Angulo : Salida del control difuso escalada en número de iteraciones en la PRU

Para la simulación de la planta (resistencias térmicas) y el controlador desarrollado, se empleó el toolbox de identificación de sistemas de Matlab (*Plant Identification*) para realizar el modelamiento la planta a controlar (resistencias térmicas ubicadas dentro del molde de inyección con sistema de canal caliente). Se utilizó una señal pulso de entrada, para ello se conectó la resistencia térmica con una señal eléctrica de 110VAC, y se obtuvo su respuesta en señal de temperatura (a través de la termocupla que tiene incorporada) tal como se muestra en la Figura 4.14.

Figura 4.14. Señal de temperatura (obtenida de termocupla incorporada en resistencia térmica) y señal pulso de entrada (señal eléctrica de 110VAC). (Elaboración propia)

Con ello se obtiene el modelo o función de transferencia de la planta (una resistencia térmica), el cual es de segundo orden como se muestra en la ecuación (4.5).

$$FT_1(Spp) = \frac{0.01455}{193.3 Spp^2 + 50.22 Spp + 1} \quad (4.5)$$

- FT_1 : Funcion de transferencia de planta (una resistencia termica del molde)
- Spp : Variable compleja

A partir de los datos obtenidos del modelamiento de la planta (ecuación (4.5)), se convierte de frecuencia a tiempo la ecuación de transferencia " $FT_1(Spp)$ " ($ft_1(t)$) en Figura 4.15) y en conjunto con el código difuso implementado en Matlab, se implementa un diagrama de bloques de lazo de control cerrado como se presenta en la Figura 4.15. Se realiza la verificación de la respuesta de la planta controlada, obteniendo como resultado el grafico en la Figura 4.16.

Figura 4.15. Diagrama de bloques de lazo de control difuso para la planta (una resistencia térmica), adaptado de del libro *Enfoque práctico de control moderno Con Aplicaciones en Matlab*, por Arnáez, 2014.

Figura 4.16 Gráfico de simulación de respuesta de la planta (resistencia térmica dentro de molde de inyección) haciendo uso del controlador difuso implementado en Matlab. (Elaboración propia)

La validación de esta etapa se evalúa en conjunto con el funcionamiento de todo el hardware y software del controlador desarrollado, y se describe en el capítulo 5 en el ítem 5.2.

4.2.4. Comunicación con HMI.

La función que cumple esta etapa de software es la del establecimiento de comunicación entre el hardware BeagleBone Black y la pantalla Nextion. Para este caso se optó por la comunicación serial mediante UART, esto debido a que se desea una comunicación independiente para la interfaz hombre máquina. Se presenta a continuación un diagrama de bloques que explica brevemente el orden de ejecución del software que permite el completo funcionamiento de esta etapa:

Figura 4.17 Diagrama de flujo de software de la comunicación con HMI mediante protocolo serial UART. (Elaboración Propia)

De esta forma, los valores de temperatura leídas en todas las zonas del molde proporcionados por la etapa anterior, Adquisición de datos, es enviada al panel táctil HMI mediante el bus de comunicación serial UART. A la vez, el BeagleBone Black recibe información del HMI, este envía los valores de referencia de temperatura que han sido ingresados manualmente por el operador.

La validación parcial de esta etapa se describe en el capítulo 5 en el ítem 5.3.

4.2.5. Comunicación PRU

Esta etapa de software cumple la función de envío y recepción de información entre el host de Linux y la PRU del BeagleBone Black. Como se comentó en el marco teórico, el host de Linux, donde se encuentra el programa principal en lenguaje C++, tiene una sección de memoria del BeagleBone Black independiente y una sección compartida. Este espacio de

memoria es compartido con las dos PRU que posee el SBC. De esta forma, la comunicación entre estos dos hardware es mediante el acceso individual desde cada uno de ellos a la sección de memoria compartida.

Se presenta a continuación un diagrama de bloques que explica la ejecución del software en el host de Linux que permite el funcionamiento de esta etapa:

Figura 4.18 Diagrama de Bloques de Software – Comunicación con PRU. (Elaboración Propia)

Como puede apreciarse en la Figura 4.18, la comunicación tiene un solo sentido, desde el host de Linux hacia la PRU del BeagleBone Black, esto es debido a que, para este proyecto, no es necesario que la PRU consulte información o confirmaciones de recepción hacia el Host de Linux.

PRU

En el siguiente ítem, se describe la implementación de software realizada sobre el hardware PRU. Actualmente se está programando solo una de las dos PRU con las que cuenta el BeagleBone Black.

4.2.6. Algoritmo de Control de Angulo de Disparo.

Esta etapa de software cumple la función de enlace entre la salida de control del BeagleBone y la interfaz de potencia. De esta forma, la salida de control del algoritmo difuso calculado

en el host de Linux, y su posterior escalamiento y seccionamiento de rango lineal (el cual se encuentra en un rango menor al de 1000000 a 250000), es transmitida hacia la PRU haciendo uso de la memoria compartida por ambos compartimientos.

Figura 4.19 Diagrama de flujo de programación de la activación de salidas de control (ángulos de disparo) en PRU. (Elaboración Propia)

El diagrama de flujo de la Figura 4.19 indica la ejecución del programa dentro de la PRU para una salida (de las ocho) de control por ángulo de disparo, el cual se inicia con la culminación de la etapa anterior, Comunicación PRU. El algoritmo inicia la iteración

principal con la interpretación de la salida de control difusa y su posterior conversión al valor “d1” equivalente en número de iteraciones. La detección de cruce por cero se interpreta como una interrupción, luego de esta se inician una serie de conteos para activar y desactivar durante un tiempo prudente una salida digital (el pin P8/46 del BBB es una de las ocho salidas de control) hacia la interfaz de potencia dentro de la frecuencia de 120Hz.

Como se menciona en el marco teórico, la PRU permite un trabajo a tiempo real e independiente del host de Linux, razón por la cual se justifica el uso del BeagleBone Black. La PRU cumple la función más importante en el controlador desarrollado: Estar a cargo de la correcta y continua alimentación a las resistencias calefactoras independientemente de lo ejecutado en el host de Linux. Y es que perder un ciclo o ciclos de alimentación (8.33ms) a las resistencias significa la pérdida de continuidad de correcto control en las mismas, afectando todo el proceso de inyección, pudiendo provocar daños en las resistencias, el molde y hasta la máquina inyectora.

Esta etapa se valida en el capítulo cinco en la sección 5.1, en una validación conjunta de hardware y software de la etapa de interfaz de potencia y estabilidad de la misma para voltajes estables de referencia en las resistencias calefactoras.

HMI

En el siguiente ítem, se describe la implementación de software realizada sobre el hardware HMI. El HMI está conformado por una pantalla táctil de 15 pulgadas de la marca Nextion y un arduino nano. Este último funciona como interlocutor entre el BeagleBone Black y la pantalla táctil, usando los protocolos SPI y serial respectivamente. De esta forma el BeagleBone Black envía los valores de temperaturas medidas hacia la pantalla, y esta logra enviar los valores de temperatura de referencia hacia el BeagleBone Black.

4.2.7. Programación de GUIDE

Esta etapa de software tiene la función de habilitación del HMI, de forma que permita la impresión de valores medidos de temperatura en la pantalla y el envío de valores de referencia hacia el BeagleBone Black. La Figura 4.20 a continuación presenta el diagrama de bloques de programación de esta etapa.

Figura 4.20. Diagrama de Bloques de Software – Programación de GUIDE (Elaboración Propia)

El software inicia con la solicitud de información de acceso para proveer protección al operador ante cualquier manipulación ajena al personal autorizado, la pantalla configurada para esta función se muestra en la Figura 4.21. Una vez que el usuario ingresa los datos de usuario y contraseña, tiene acceso a la pantalla de visualización (Figura 4.22) y configuración de temperaturas de referencia.

Figura 4.21 Pantalla de Acceso en Nextion Editor (Elaboración Propia)

Figura 4.22 Pantalla de visualización en Nextion Editor (Elaboración Propia)

En base a lo mostrado en las Figura 4.21 y Figura 4.22 se cumple con lo indicado por Lisama (2008) y Wonderware (2019), al diseñar una pantalla interfaz hombre máquina que presente la información de las variables del proceso a tiempo real entregando valores numéricos de forma organizada y correctamente distribuida en la pantalla.

Esta etapa se valida en el capítulo cinco en la sección 5.3.

5. CAPÍTULO 5: PRUEBAS DE VALIDACIÓN Y RESULTADOS

Las pruebas de validación orientadas a medir el desempeño y los resultados obtenidos se describen a continuación primero por cada parte que compone este producto y finalmente de la solución desarrollada aplicándose en la máquina inyectora de plástico.

5.1. Validación de interfaz de potencia

La validación de esta etapa del sistema se realiza mediante la medición de las variables que forman parte de la implementación:

5.1.1. Variables o parámetros a medir

Las variables medidas en esta etapa son: el ángulo de disparo, el voltaje eficaz de resistencia termo-eléctrica.

5.1.2. Lugar y fecha de la prueba

La prueba de esta etapa se realizó en el taller Qumir SAC en San Juan de Lurigancho el día 7 julio del presente 2019.

5.1.3. Equipamiento y materiales utilizados

Se lista a continuación el equipamiento utilizado para las pruebas de validación de esta etapa:

- Laptop DELL Inspiron 15.
- Multímetro Fluke 709.
- Conector termopar K de multímetro, usado para contrastar la medición.
- Resistencias termoeléctricas 900W tipo espiral (fuera del molde de inyección), las cuales cuentan con termocuplas internas.
- Partes del controlador desarrollado utilizadas: SBC BeagleBone Black, Tarjetas de potencia.

5.1.4. Procedimiento de medición

Cabe indicar que las validaciones de cada etapa individual no se llevaron a cabo haciendo uso de una inyectora. La prueba de validación del controlador desarrollado con la inyectora marca Bole se realizaron con la culminación de todas las validaciones parciales. A continuación, se describe brevemente paso a paso el procedimiento de medición:

Paso 1: Ubicación los equipos y materiales. Se coloca las resistencias calefactoras (las cuales cuentan con termopar incluido) sobre bloques de acero, el mismo material de moldes de

inyección. Se coloca las partes del controlador (BeagleBone Black, tarjetas de potencia) sobre una manta antiestática en una mesa.

Paso 2: Conexión. Se realiza la conexión entre la PC, el BBB y las tarjetas de potencia. Se realiza una conexión de las resistencias calefactoras con las sondas del multímetro Fluke para medir su tensión. Se alimenta el controlador (fuente 5V) y la etapa de potencia con la red eléctrica de 220VAC.

Paso 3: Inicialización de controlador. Una vez energizado, el BeagleBone realiza todas las etapas de software descritas en el capítulo 4. Para la validación de esta etapa no se está utilizando la etapa de sensado, pues el objetivo es medir tensiones estables, y la etapa de control (lógica difusa) no se encarga de estabilizar la tensión de las resistencias calefactoras, sino la temperatura variando la tensión de las mismas.

Paso 4: Variación de tensión en resistencias calefactoras. Mediante comunicación entre la PC y el BeagleBone Black (ver sección 2.1 del marco teórico) se establece los valores de referencia estables de tensión en las resistencias (indirectamente mediante los ángulos de fase correspondientes).

Paso 5: Toma de datos para validación. Se procede a tomar los datos de voltaje de las resistencias obtenidos con el multímetro frente a los ángulos de disparo establecidos desde la PC.

5.1.5. Resultados en tablas y/o figuras.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.1 presentado los valores de voltaje de las resistencias obtenidos con el multímetro (valor medido), los valores teóricos, y los ángulos de disparo establecidos desde la PC. En la Figura 5.1 se muestran imágenes de las lecturas obtenidas con osciloscopio de los voltajes del ángulo de disparo y de la carga (resistencia calefactora).

Tabla 5.1

Validación parcial de etapa de potencia

Angulo [°]	Vrms teórico (Ec.(10))	Vrms real (Fluke 709)	% de Error
7	4.3	4.3	0.00%
10	7.4	7.2	1.35%
26	30.3	30.1	0.66%
46	68.3	68.5	0.29%
66	109.6	109.8	0.18%
84	144.9	145.2	0.21%
101	173.3	173.1	0.12%
119	196.3	196.2	0.05%
137	211.0	211.1	0.05%

Nota: La tabla muestra los valores de tensión obtenidos de forma teórica y del multímetro Fluke para diferentes ángulos de disparo. Elaboración propia.

Figura 5.1 Lecturas de osciloscopio de los voltajes del ángulo de disparo y de la resistencia térmica controlada por etapa de potencia (Elaboración propia)

5.1.6. Comentarios y conclusiones de la etapa

Se listan a continuación los comentarios y conclusiones de esta etapa del diagrama general respecto a las mediciones presentadas en la tabla y figuras del ítem previo:

- La variación entre los valores teóricos y medidos son de máximo 0.2VAC, logrando un mínimo porcentaje de error.
- La Figura 5.1 muestra las gráficas de tensión de control y fuerza de una sola resistencia para un ángulo de disparo (1 zona). La validación, sin embargo, se realizó para las 8 zonas independientemente.

- Según la primera imagen de la Figura 5.1, el controlador desarrollado logra una perfecta sincronización con la red eléctrica al obtener las señales de cruce por cero. Cabe resaltar que la imagen en mención es la del ángulo de disparo, no la de cruce por cero, y logra una frecuencia de 120.2Hz.
- Con las mediciones realizadas con el osciloscopio en la salida de control (entradas de control de la interfaz de potencia) se logra una doble validación: correcta detección de cruce por cero, y correcto y sincronizado ángulo de disparo. Esto es posible solo si la referencia es estable, por lo que no se usa el control difuso para estas pruebas ya que dificultaría las mediciones.

5.2. Validación de control de temperatura de las resistencias térmicas del molde con sistema de canal caliente.

La validación de esta etapa del sistema se realiza mediante la medición de las variables que forman parte de la implementación:

5.2.1. Variables o parámetros a medir

La variable medida en esta etapa es la temperatura de la resistencia calefactora.

5.2.2. Lugar y fecha de la prueba

La prueba de esta etapa se realizó en el taller Qumir SAC en San Juan de Lurigancho el día 1 agosto del presente 2019.

5.2.3. Equipamiento y materiales utilizados

Se lista a continuación el equipamiento utilizado para las pruebas de validación de esta etapa:

- Laptop DELL Inspiron 15.
- Multímetro Fluke 709.
- Conector termopar tipo K de multímetro Fluke, usado para contrastar la medición.
- Resistencias termoeléctricas 900W tipo espiral (fuera del molde de inyección), las cuales cuentan con termocuplas internas.
- Partes del controlador desarrollado utilizadas: SBC BeagleBone Black, Tarjetas de potencia, Tarjetas ADC+filtro. Se incluye todo el software desarrollado en el BBB incluyendo el control difuso.

Esta etapa no se ha desarrollado dentro de un molde de inyección con sistema de canal caliente, solo se hace uso de las resistencias térmicas del mismo a la intemperie. La

validación completa, con una inyectora plástica, y sobre los moldes con sistema de canal caliente se describen en la sección 5.4 de esta tesis.

5.2.4. Procedimiento de medición

A continuación, se describe brevemente paso a paso el procedimiento de medición:

Paso 1: Ubicación los equipos y materiales. Se coloca las resistencias calefactoras (las cuales cuentan con termopar incluido) sobre bloques de acero, el mismo material de moldes de inyección. Se coloca las partes del controlador (BeagleBone Black, tarjetas de potencia, Tarjetas ADC+filtro) sobre una manta antiestática en una mesa.

Paso 2: Conexionado. Se realiza la conexión entre la PC, el BBB, las tarjetas ADC, las tarjetas de potencia y la alimentación (220VAC). El conector termopar tipo K del multímetro Fluke se coloca junto a las resistencias térmicas para medir la temperatura de las mismas. El resultado de esto se muestra en la Figura 5.2

Figura 5.2. Validación parcial - Lectura de temperaturas del controlador desarrollado referente al medido por multímetro Fluke con termopares a la intemperie (Elaboración propia).

Paso 3: Inicialización de controlador. Una vez energizado, el BeagleBone realiza todas las etapas de software descritas en el capítulo 4. Para la validación de esta etapa es necesario el uso de todas las demás a excepción de la interfaz HMI. En esta oportunidad es de mucha utilidad la etapa de control (con lógica difusa), ya que esta estabiliza la temperatura medida en la resistencia calefactora variando la tensión de la misma.

Paso 4: Establecimiento de temperaturas de referencia. Mediante comunicación entre la PC y el BeagleBone Black se establece los valores de referencia de temperatura en las resistencias.

Paso5: Toma de datos para validación. Se procede a tomar los datos de temperatura de las resistencias obtenidos con el multímetro (medición de temperatura) frente a los valores de adquiridos por el controlador desarrollado.

5.2.5. Resultados en tablas y/o figuras

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.2 presentado los valores de temperatura de las resistencias obtenidos con el multímetro (valor medido), los valores obtenidos con el controlador desarrollado, y los valores de referencia establecidos desde la PC.

Tabla 5.2

Validación de etapa de adquisición de señales de temperatura de las resistencias calefactoras

T. Referencia (PC)	Medido (Controlador)	Medido real (Fluke 709)	Medido (Fluke 709) offset 1.2°	% de Error
150	149.08	147.9	149.1	0.01%
150	149.11	147.8	149	0.07%
150	149.15	148	149.2	0.03%
150	149.29	148	149.2	0.06%
150	149.31	148.1	149.3	0.01%
150	149.26	148.1	149.3	0.03%
150	149.22	148	149.2	0.01%
150	149.27	148.1	149.3	0.02%
150	149.34	148.1	149.3	0.03%
150	149.45	148.2	149.4	0.03%
150	149.37	148.1	149.3	0.05%
150	149.43	148.1	149.3	0.09%
150	149.47	148.2	149.4	0.05%
150	149.53	148.3	149.5	0.02%
150	149.57	148.3	149.5	0.05%
150	149.55	148.2	149.4	0.10%
150	149.62	148.4	149.6	0.01%
150	149.69	148.4	149.6	0.06%

Nota: La información muestra los valores de temperatura obtenidos del controlador desarrollado y del multímetro Fluke durante un tiempo determinado (120 segundos) para una temperatura de referencia (200° Celsius). Elaboración propia.

La Figura 5.3 muestra una comparación de la respuesta de la planta (una resistencia calefactora) haciendo uso del controlador difuso desarrollado en lazo cerrado y lo obtenido por simulación en el ítem 4.2.3.

Figura 5.3 Gráfico de simulación de respuesta de la planta (resistencia térmica dentro de molde de inyección) haciendo uso del controlador difuso implementado en Matlab (simulación) vs el controlador desarrollado (real). (Elaboración propia)

5.2.6. Comentarios y Conclusiones de la etapa

Se listan a continuación los comentarios y conclusiones de esta etapa del diagrama general respecto a las mediciones presentadas en las tablas del ítem previo:

- En la Tabla 5.2 se observa que el valor medido por el controlador es un poco más variante en comparación con el valor medido por el multímetro Fluke. Esto se debe a las siguientes razones:
 - Los sensores no se encuentran en el mismo punto de medición. En la validación parcial (sección 4.2.2) se puede apreciar que la variación entre ambas mediciones es mucho menor (error máximo de 0.05°C), esto es porque los sensores se ubicaban juntos en el mismo punto de medición (ver Figura 4.5).
 - La termocupla del controlador desarrollado se encuentra dentro de la resistencia calefactora, haciendo que su medición sea más precisa. Aunque los valores tabulados den la impresión que lo medido por con controlador presente ruido y sea menos estable que lo del multímetro Fluke, la lectura del controlador desarrollado es la correcta, pues ya se validó en el capítulo 3.

- Ambas termopares se encuentran al aire libre (sobre un bloque metálico), en la validación parcial de la sección 4.2.2, ambas se encontraban juntas y en el mismo recinto, simulando estar dentro del molde de inyección.
- La variación entre los valores de temperatura obtenidos por el controlador y el multímetro, a pesar de ser tener diferentes puntos de medición, sigue siendo muy reducida, logrando así un mínimo porcentaje de error.
- La precisión del multímetro Fluke es de 0.1°C y la precisión de lectura de temperatura del controlador desarrollado es de 0.059°C .
- La Tabla 5.2 muestra un cuadro comparativo de medición de temperatura de una sola resistencia (1 zona). La validación, sin embargo, se realizó para las 8 zonas.
- El *offset* es mayor (1.2°C) que el de las lecturas obtenidas en la sección 4.2.2 (0.2°C) de esta tesis. Esto se debe a que para este caso, como se ve en la Figura 5.2, los termopares se encuentran físicamente en diferentes lugares y a la intemperie. Sin embargo se puede confiar en los valores leídos por el controlador desarrollado ya que en la sección 4.2.2 se validó esta acción.
- Los valores adquiridos de la temperatura controlada al valor de referencia de 150°C se evalúan durante horas y se verificó que se obtiene un error máximo de 0.92°C .
- Con esta tabla se valida también el control difuso desarrollado, pues como se mencionó, la diferencia máxima (0.92°C) entre el valor de referencia y el valor medido por el controlador desarrollado cumple con el objetivo de control (menor a 1°C).
- Con respecto a la comparación de respuestas simulada versus real de la Figura 5.3, se debe considerar que la simulación no cuenta con la perturbación (positiva) del calor emitido por las otras 7 resistencias. En el caso real, sin embargo, a pesar de tener estas perturbaciones, logra corregirse y controlar correctamente hasta llegar al valor de referencia sin sobre impulsos y sin acelerar bruscamente.

5.3. Validación de envío de información a interfaz HMI (local)

La validación de esta etapa del sistema se realiza mediante la medición de las variables que forman parte de la implementación:

5.3.1. Variables o parámetros a medir

El parámetro a medir en esta etapa es el correcto envío de información (temperatura de referencia y temperatura medida) entre el BeagleBone Black y las interfaces HMI.

5.3.2. Lugar y fecha de la prueba

La prueba de esta etapa se realizó en el taller Qumir SAC San Juan de Lurigancho el día 7 septiembre del presente 2019.

5.3.3. Equipamiento y materiales utilizados

Se lista a continuación el equipamiento utilizado para las pruebas de validación de esta etapa:

- Laptop DELL Inspiron 15.
- Conector termopar tipo K de multímetro Fluke.
- Resistencias termoeléctricas 900W tipo espiral (fuera del molde de inyección), las cuales cuentan con termocuplas internas.
- Partes del controlador desarrollado utilizadas: SBC BeagleBone Black, Tarjetas de potencia, Tarjetas ADC+filtro, pantalla táctil Nextion.

5.3.4. Procedimiento de medición

A continuación, se describe brevemente paso a paso el procedimiento de medición:

Paso 1: Ubicación los equipos y materiales. Se coloca las partes del controlador (BeagleBone Black, Pantalla Nextion) sobre una manta antiestática en una mesa.

Paso 2: Conexión. Se realiza la conexión entre la pantalla, PC local, PC remota, el BBB, las tarjetas ADC, las tarjetas de potencia y la alimentación (220VAC).

Paso 3: Inicialización de controlador. Una vez energizados el controlador y la pantalla, el BeagleBone realiza todas las etapas de software descritas en el capítulo 4. Sin embargo, solo se utiliza las comunicaciones por protocolo serial con la pantalla Nextion.

Paso 4: Establecimiento de temperaturas en BBB. Mediante comunicación entre la PC y el Beaglebone Black se establece los valores de lectura (simulación de adquisición de valores de ADCs) de temperatura en las resistencias.

Paso 5: Establecimiento de puntos de referencia desde la pantalla. Desde la pantalla táctil Nextion se establece los valores de referencia de las temperaturas de las resistencias.

Paso 6: Almacenamiento de valores de temperatura en archivos de texto. El BeagleBone almacena en archivos de texto los valores de temperatura enviados a la pantalla y los valores de referencia de temperaturas recibidas desde la misma.

Paso 7: Toma de datos para validación. Se procede a tomar los datos de temperatura medidas (por simulación) y de referencia desde los archivos de texto por el controlador desarrollado, y se compara con lo mostrado en la pantalla HMI.

5.3.5. Resultados en tablas y/o figuras

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.3 y Tabla 5.4. En la primera se presenta los valores de temperatura de las resistencias obtenidos con el BeagleBone Black (por simulación), y los leídos desde la pantalla táctil. En la segunda se presentan los valores de referencia ingresados desde la pantalla y los leídos desde el BeagleBone Black.

Tabla 5.3

Validación de etapa de adquisición de señales de temperatura de las resistencias calefactoras – comunicación desde BBB hacia HMI (temperaturas leídas)

T. Leída por BBB (Simulación)	T. Leída desde Pantalla HMI	% de Error
140.88	140.88	0.00%
150.99	150.99	0.00%
160.11	160.11	0.00%
170.22	170.22	0.00%
180.33	180.33	0.00%
190.44	190.44	0.00%
200.55	200.55	0.00%
210.66	210.66	0.00%
220.77	220.77	0.00%
230.88	230.88	0.00%
240.99	240.99	0.00%
250.00	250.00	0.00%
260.11	260.11	0.00%
270.22	270.22	0.00%
280.33	280.33	0.00%

Nota: La información muestra los valores de temperatura obtenidos del controlador desarrollado (simulación) y enviados a la pantalla HMI. Elaboración propia.

Tabla 5.4

Validación de etapa de adquisición de señales de temperatura de las resistencias calefactoras– comunicación desde HMI hacia BBB (temperaturas de referencia)

T. Ref. ingresado desde Pantalla	T. Ref. Leído desde BBB	% de Error
120.66	120.66	0.00%
130.77	130.77	0.00%
140.88	140.88	0.00%
150.99	150.99	0.00%
160.11	160.11	0.00%
170.22	170.22	0.00%
180.33	180.33	0.00%
190.44	190.44	0.00%
200.55	200.55	0.00%
210.66	210.66	0.00%
220.77	220.77	0.00%
230.88	230.88	0.00%
240.99	240.99	0.00%

Nota: La información muestra los valores de referencia de temperatura ingresados desde la pantalla táctil y los leídos por el BeagleBone Black. Elaboración propia.

5.3.6. Comentarios y Conclusiones de la etapa

Se listan a continuación los comentarios y conclusiones de esta etapa del diagrama general respecto a las mediciones presentadas en las tablas del ítem previo:

- Para la validación de esta etapa se obvió el uso de las tarjetas ADC y Potencia debido a que el objetivo es verificar el correcto envío de información entre el BeagleBone Black y la pantalla Nextion.
- Se puede verificar mediante la Tabla 5.3 que los valores enviados desde el BeagleBone Black hacia la pantalla Nextion son correctos.
- Se puede verificar mediante la Tabla 5.4 que los valores enviados desde la pantalla Nextion hacia el BeagleBone Black son correctos. Por lo cual, ambas tablas validan un correcto envío y recepción de información entre el BeagleBone y la interfaz HMI.
- Las tablas muestran los valores de temperatura de una única zona. La validación, sin embargo, se realizó para las 8 zonas.

5.4. Pruebas de validación y resultados del controlador desarrollado.

En los ítems anteriores se describen la validación del correcto funcionamiento del controlador desarrollado evaluando todas las etapas que lo componen (Etapas de adquisición, etapa de control, interfaz de potencia, interfaces HMI). En esta parte se detalla las pruebas de validación del uso del controlador desarrollado en un molde de inyección con canal caliente de 8 zonas, esto durante el funcionamiento de la máquina de inyección de plástico (escenario real).

5.4.1. Lugar y fecha de la prueba

La prueba del controlador desarrollado en un molde de canal caliente sobre una máquina inyectora se realizó en la planta Q'UMIR PLAST S.A.C ubicada en San Juan de Lurigancho el día 24 de noviembre del presente 2019.

5.4.2. Equipamiento y materiales

Se lista a continuación el equipamiento utilizado para las pruebas de validación de esta etapa:

- Laptop DELL Inspiron 15.
- Resistencias termoeléctricas 900W tipo espiral (fuera del molde de inyección), las cuales cuentan con termocuplas internas.
- Controlador desarrollado – Todas sus etapas de hardware y software son utilizadas: SBC BeagleBone Black, Tarjetas de potencia, Tarjetas ADC+filtro, pantalla táctil Nextion.
- Molde de inyección con sistema de canal caliente.
- Inyectora de plástico.
- Sistema de refrigeración.
- Polímeros en pellets.

5.4.3. Variable(s), parámetro(s) o medición a validar

Los parámetros a medir en esta etapa son: Temperatura controlada, Calidad de los productos de plástico.

5.4.4. Medición o prueba de referencia (Gold Standar)

La prueba de referencia se realizó utilizando todos los equipos listados en el ítem 5.4.2, a excepción del controlador desarrollado, y en su lugar, el controlador actualmente usado por el cliente: Tablero conteniendo controladores de uso general (ver Figura 5.4). Este

controlador, como se mencionó en el primer capítulo, es comúnmente usado por las pymes del sector en país, y para este caso está compuesto por controladores modulares.

Figura 5.4 Fotografía Controlador de Molde de Inyección del cliente (Elaboración Propia)

Las características y resultados de producción haciendo uso del controlador del cliente se listan a continuación:

- Alta aceleración, es necesaria la manipulación del operador, arrancar y detener el controlador. Es necesario el conocimiento de control PID por parte de los operadores del sistema de inyección.
- La alta aceleración provoca un primer sobre-impulso.
- El control tiene un error mayor a 1°C con respecto al valor de referencia (error de medición 1°C).
- Se consigue el primer buen producto plástico luego de cinco pruebas de inyección.
- Las primeras pruebas de inyección tienen errores visuales:
 - Pieza incompleta.
 - Pieza completa con secciones delgadas (más transparentes).
 - Pieza completa, diseños no completos.

- Pieza completa con flacidez (sin dureza).
- Los productos son correctos en grosor, transparencia y dureza luego del quinto producto.

La Figura 5.5 a continuación es una fotografía realizada en la planta de inyección Qumir Plast. Esta presenta un producto plástico (color rojo) saliendo de la inyectora, este sin embargo se encuentra incompleto.

Figura 5.5 Fotografía Sistema de Inyección de Qumir Plast, producto plástico incompleto (Elaboración Propia)

5.4.5. Prueba de validación adicional (Escenario de dificultad)

El controlador desarrollado ha sido probado en una situación real, trabajando junto a una inyectora de marca Bole en la planta de inyección plástica Qumir Plast, El trabajar en un proceso secuencial junto a estas máquinas (Inyectoras) implica que el controlador trabaje continuamente en los siguientes escenarios de dificultad:

- La inyectora genera una adición de calor extra debido a que se encuentra debidamente cerca del molde de inyección.
- El fluido de plástico genera también una adición de calor extra al molde.
- La presión que ejerce la inyectora al transportar fluido líquido de plástico genera también una adición de calor extra al molde.
- El fluido de agua de enfriamiento y aire que transita dentro del molde.

Los mencionados anteriormente, desde el punto de vista de un sistema de control, se convierten en perturbaciones. Como se describirá a detalle en el ítem siguiente, el controlador ha funcionado correctamente junto a la inyectora.

5.4.6. Resultados

El primer parámetro de validación es la temperatura controlada. Este parámetro del controlador con lógica difusa desarrollado tiene los siguientes resultados en su uso con un sistema de inyección plástica:

- Velocidad de cambio de temperatura constante y no brusco. El controlador desarrollado, a diferencia al del cliente, presenta un control suave.
- Tiempo de etapa de transitoria mayor (referente al del controlador del cliente) pero sin sobre impulsos que puedan afectar al sistema de inyección (molde, inyectora).
- A diferencia del controlador de cliente, el control realizado por el prototipo desarrollado durante la etapa estacionaria es preciso (error de control menor a 1°C).

La Figura 5.6 muestra una gráfica comparativa del control realizado tanto por el controlador del cliente (control PID con parámetros por defecto), como por el controlador desarrollado (control difuso).

Figura 5.6 Gráfica comparativa de control de temperatura del mismo molde de inyección durante el inicio de producción. (Elaboración propia)

El segundo parámetro de validación es visual: la calidad del producto. Actualmente no se cuenta con otra forma de medición/validación que la experiencia en inspección de productos

finales del operador. De esta forma, las características y resultados visuales y físicos de producción haciendo uso del controlador desarrollado fueron:

- Correcta aceleración, sin cambios bruscos. No es necesaria la manipulación del operador durante la etapa de inicialización del sistema. No es necesario el conocimiento de ingeniería de control por parte de los operadores del sistema de inyección.
- La correcta aceleración evita el sobre-impulso de temperatura, protegiendo al molde de llegar a temperaturas no deseadas.
- El error del control es menor a 1°C con respecto al valor de referencia.
- Se consigue el primer producto plástico correcto (validación visual y física del operario) desde la primera prueba de inyección. Todas las inyecciones cumplen con las siguientes características:
 - Pieza completa.
 - Todas las secciones son uniformes (no existe secciones delgadas o más transparentes).
 - Diseños completos.
 - Pieza no presenta flacidez (dureza correcta y uniforme).
- Los productos son correctos en grosor, transparencia y dureza desde el primer producto plástico obtenido.

De esta forma se presenta a continuación en la Tabla 5.5 un cuadro comparativo de los resultados obtenidos en los seis primeros ciclos de inyección. Se presenta los mismos resultados en una gráfica en la Figura 5.7.

Tabla 5.5

Tabla comparativa de los resultados obtenidos en los seis primeros ciclos de inyección

	1ra inyección		2da inyección		3ra inyección		4ta inyección		5ta inyección		6ta inyección	
Controlador	Cliente	Tesis	Cliente	Tesis	Cliente	Tesis	Cliente	Tesis	Cliente	Tesis	Cliente	Tesis
Forma	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Diseños	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si
Grosor	No	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Transparencia	No	Si	No	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Dureza	No	Si	No	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Nota: La información muestra los resultados obtenidos al comparar la calidad de los productos en cada ciclo de inyección. Elaboración propia.

Figura 5.7 Gráfica comparativa de calidad de producto por cada ciclo de inyección. (Elaboración propia)

Como se aprecia en la Figura 5.6, el tiempo que tarda el valor de temperatura desde el arranque del controlador difuso hasta llegar al valor de referencia y casi de inmediato a la etapa estacionaria, es de 3 minutos aproximadamente. Con respecto a la gráfica de temperatura donde se hace uso del controlador PID del cliente, la etapa transitoria tiene una duración también de 3 minutos, sin embargo, un pico mayor al 10% del valor de referencia y al primer minuto. Esto implica que el controlador del cliente proporciona un alto riesgo de daño/desgaste del molde de inyección. El controlador desarrollado por su parte, llega de una forma suave, sin cambios bruscos y sin sobrepasar de forma abrupta el valor de referencia ingresado por el operador.

Por otro lado, desde el punto de vista económico, recordando el cuadro de costos de hardware del proyecto (Tabla 5.6), y considerando que las horas-hombre efectivas invertidas en el proyecto fueron 110 horas (dos ingenieros, 5 meses), a un costo de 20 dólares americanos por hora-hombre, resulta en un total de 35200 dólares americanos (sin IGV) de inversión adicionales.

Tabla 5.6
Cuadro económico parcial del hardware del proyecto

Nombre	Und.	Costo Unitario (Soles)	Costo Total (Soles)
Beaglebone Black	1	S/289.80	S/289.80
Software de programacion: Notepad++	1	S/0.00	S/0.00
Switch TPLINK	1	S/50.00	S/50.00
Componentes Tarjeta Adquisición	10	S/25.20	S/252.00
Componentes Tarjeta de potencia	10	S/22.05	S/220.50
Componentes Tarjetas matrices	2	S/15.00	S/30.00
Servicio Desarrollo de tarjetas	1	S/1,200.00	S/1,200.00
Fuente 5V nacional	1	S/50.00	S/50.00
Rollo cable apantallados	1	S/90.00	S/90.00
Cable UTP	1	S/30.00	S/30.00
Pantalla Touch Nextion 10"	1	S/620.55	S/620.55
Chasis	1	S/500.00	S/500.00
Total Soles			S/3,043.05
Total Dólares			\$966.05

Nota: Se ha realizado la suma de costos parcial de todos los equipos, componentes y productos dispuestos por los desarrolladores (hardware). Elaboración propia.

Como se mencionó en la justificación económica (ítem 1.3.3), el precio de venta propuesto del controlador desarrollado para su competencia en el mercado nacional, es de 2100 dólares americanos. Un precio muy competitivo y accesible para las PYMES considerando que este controlador, en un futuro cercano, puede ser aún más escalable pudiendo alcanzar a controlar hasta 128 zonas.

El costo total de inversión, al precio de venta indicado del controlador desarrollado, se podría recuperar luego de la venta número 32. A partir de esa venta, la ganancia bruta se convierte en 1100 dólares americanos por cada venta.

CONCLUSIONES

- Se logra el objetivo general al desarrollar un prototipo de controlador industrial de temperatura de 8 zonas para un molde de inyección de plástico de sistema de canal caliente que permita mejorar el actual proceso de operación y producción de objetos de plástico, con calidad, una buena interfaz con el sistema y de bajo costo para las PYMEs del sector.
- Se cumple con el objetivo específico que refiere al logro de desarrollo de una estructura metálica que resguarde al hardware del controlador de daños físicos y que brinde comodidad y una interfaz amigable al operador.
- Se cumple con el objetivo específico que refiere a desarrollar un sistema electrónico de control de temperatura para moldes de inyección de plástico con sistemas de canal caliente. Cumpliendo con el indicador, el controlador permite realizar 8 controles difusos independientes (uno por cada zona) en el molde de inyección y es capaz de regular la temperatura con un error máximo de 1 °C.
- Se cumple con el objetivo específico referido a desarrollar un algoritmo computacional que permita integrar 8 ADCs, 8 controles difusos, 8 interfaces de potencia y una interfaz gráfica HMI táctil local. Cumpliendo con lo establecido como indicador, se ha logrado el desarrollo de un algoritmo en C++ que cuenta con la capacidad de integrar todas las etapas de la arquitectura desarrollada: Adquisición, Tratamiento, Control, Potencia y HMI.
- Se cumple con el objetivo específico referido a validar el controlador propuesto en un escenario real. Cumpliendo con lo establecido como indicador, se ha hecho uso del controlador desarrollado para un molde de sistema de canal caliente de la inyectora del cliente, y se ha obtenido productos plásticos de calidad, todos con correcta forma diseño, grosor, transparencia y dureza.

RECOMENDACIONES PARA TRABAJO FUTUROS

- Uso del indicador de temperatura portátil Fluke Calibration 1523PRT, el cual cuenta con una precisión de medida de hasta ± 0.011 °C mediante RTDs. El uso de este equipo sería ideal para la verificación de correcto estado y medición de las termocuplas y los ADCs.
- Actualmente existen SBCs BeagleBone Black que cuentan con módulos Wifi incorporados en la misma placa, estos podrían ser usados evitando así el uso de cables de red (el cual se conecta al Switch de la empresa).
- Actualmente el número máximo de señales mostradas en tiempo simultáneo en una tendencia es de solo 4, esto debido a que se hace uso de la librería básica del software Nextion. Esto podría mejorarse si el diseño del producto se enfoca un poco más al desarrollo del IDE.
- El control de enfriamiento de uno de las secciones del molde puede ser una tesis que apunte a reducir el tiempo de ciclo de inyección. Esto sin embargo podría aplicarse a ciclos de inyección muy amplios, los cuales son comunes en la producción de materiales plásticos de gran tamaño, como por ejemplo sillas, donde el ciclo de inyección varía entre 1 a 2 minutos
- El controlador desarrollado permite el control de 8 zonas, no obstante, el BeagleBone puede soportar muchas más, el diseño de hardware realizado se puede replicar varias veces para obtener más zonas, igualmente el software bajo ciertos ajustes.
- Las versiones más recientes de sistemas operativos Linux compatibles con Beaglebone tienen compatibilidad con el software Node-red, el cual permitiría que el controlador tenga acceso al IIOT al igual que lo hacen controladores de marcas importantes como Siemens. Estas versiones sin embargo, no trabajan con el sistema usado en el BBB de esta tesis, se debe realizar una completa investigación de los modernos sistemas *embedded* BeagleBone.

6. REFERENCIAS

Abery (2019). Moldes de Inyección. Recuperado de <http://es.aberyplastics.com/info/hot-runner-20190111.html> [Consulta: 5 de agosto de 2019].

Antek (2019). Antek MADISON Plastics Corporation. Recuperado de <http://www.antekmadison.com/prime.html> [Consulta: 23 de septiembre de 2019].

Arnaez, E. (2014). Enfoque práctico de control moderno Con Aplicaciones en Matlab. 1ª ed. Peru: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas S. A. C.

Arnaez, E. (2014). Control Difuso. Apuntes de clase [Consulta: 19 de mayo del 2015].

Arnaez, E. (2000). Control Difuso (Fuzzy Logic). Presentación PowerPoint, Apuntes de clase. [Consulta: 23 de diciembre del 2017].

AUTONICS (2019). Temperature controllers Autonics. Recuperado de <https://www.autonics.com/product/category/2000015> [Consulta: 18 de octubre de 2018].

Benjamin machinery Co. (2019). Máquina que sopla de la botella del regulador del PLC para las diversas botellas ISO9001. Recuperado de <http://spanish.bottling-fillingmachine.com/sale-7686566-plc-controller-bottle-blowing-machine-for-various-bottles-iso9001.html> [Consulta: 23 de noviembre de 2019].

BOLE (2019). Máquinas inyectoras Bole Machinery. Recuperado de <http://es.bolemachinery.com/> [Consulta: 2 de diciembre de 2019].

DME (2016). DME HOT RUNNER & CONTROL SYSTEM. Recuperado de <https://www.dme.net/catalog/DME/PDF/Hot%20Runner.pdf> [Consulta: 3 de junio de 2019].

Escudero, J., PARADA, M., & SIMON, F. Tema 8: Convertidores A/D (ADC). Recuperado de http://www.dte.us.es/ing_inf/ins_elec/temario/Tema%208.%20Convertidores%20A-D.pdf [Consulta: 28 de noviembre de 2018].

FADIPAST (2019). INYECCION DE PLASTICO MOLDEO DE PLASTICO POR INYECCION. Recuperado de <https://fadiplast.com/inyeccion-de-plastico/> [Consulta: 7 de septiembre de 2019].

HUSKY (2019). Altanium Mold Controllers. Recuperado de <https://www.husky.co/Interior.aspx?id=5039> [Consulta: 20 de enero de 2019].

Kemper, G. (2000). *Procesamiento Avanzado de Señales e Imágenes*. Presentación PowerPoint. Lima.

Laboratorio de Procesado de Imagen (LPI). (2004). Teorema de Muestreo. Recuperado de <http://www.lpi.tel.uva.es/~santi/slweb/muestreo.pdf> [Consulta: 28 de noviembre de 2013].

Maloney, T. (2006). *ELECTRONICA INDUSTRIAL MODERNA*. 5ª ed. [Trad. C. Mendoza]. México: PEARSON EDUCATION.

Méndez, A. (2016). *DISIPADORES TÉRMICOS PARA DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS*. Recuperado de http://ieb-srv1.upc.es/gieb/tecnicas/pdf/disipadores_termicos.pdf [Consulta: 28 de julio de 2019].

Molloy, D. (2019). *Exploring BeagleBone Tools and Techniques for Building with Embedded Linux*. 2ª ed. Indianapolis: John Wiley & Sons, Inc.

NIST (2018). NIST ITS-90 Thermocouple Database, National Institute of Standards and Technology (NIST) Standard Reference Database 60 Version 2.0 (Web Version). Recuperado de <https://srdata.nist.gov/its90/main/> [Consulta: 16 de julio de 2019].

Pajankar, A. (2015). *Raspberry Pi Computer Vision Programing*. UK: Packt Publishing Ltd.

Rashid, M. (1995). *Electronica de potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones*. 2ª ed. [Trad. G. Sanchez]. Mexico: Prentice Hall Inc.

Ruiz, E. (2008). Desarrollo de una interfaz hombre máquina orientada a control de procesos. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, 11(1), 70-72.

SIN (2019). Fabricación de productos de plástico REPORTE SECTORIAL N° 04 – 2019. Recuperado de https://www.sni.org.pe/wp-content/uploads/2019/07/Reporte-Sectorial-Pl%C3%A1sticos_2019.pdf [Consulta: 4 de junio de 2019].

SYNVENTIVE (2008). Hot Runner Technology. Examples of Hot Runners in use. http://www.synventive.com/uploadedFiles/Products/Hot_Runner_Systems/Manifolds/PDFs/MK-PRM.BRM.GB-HRAPPL.pdf [Consulta realizada 16/09/2014].

Texas Instrument Incorporated (2018). AM335x Sitara™ Processors. Recuperado de <https://www.ti.com/lit/ds/symmlink/am3358.pdf> [Consulta: 2 de abril de 2019].

Texas Instrument Incorporated (2017). BTA316X series B, C and E. Recuperado de <https://www.mouser.com/datasheet/2/848/bta316x-800c-1520235.pdf> [Consulta: 2 de abril de 2019].

Texas Instrument Incorporated (2011). How delta-sigma ADCs work, Part 1. Recuperado de <http://www.ti.com/lit/an/slyt423a/slyt423a.pdf> [Consulta: 28 de marzo de 2019].

Texas Instrument Incorporated (1995). MOC3020 THRU MOC3023 OPTOCOUPLERS /OPTOISOLATORS. Recuperado de <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/27238/TI/MOC3023.html> [Consulta: 26 de junio de 2019].

Wonderware (2019). *Interfaz Hombre-Máquina (HMI)*. España: Wonderware. Recuperado de <https://www.wonderware.es/hmi-scada/que-es-hmi/> [Consulta: 20 de julio de 2019].

Zhang, P. (2010). Advanced Industrial Control Technology. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=OPlhfkU05DMC&pg=PA22&dq=Zhang+single+board+computer+2010&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiD6-TcsaTkAhUSj1kKH XtIDD MQ6AEIKzAA#v=onepage&q=Zhang%20single%20board%20computer%202010&f=false> [Consulta: 27 de junio de 2019].

7. APÉNDICES

Configuración de Capas del BeagleBone Black

En las tablas de la Figura 7.5 y la Figura 7.6 se puede apreciar ocho modos de configuración de los pines (M0 – M7), los cuales hacen referencia a los tres primeros bits de configuración de pines GPIO (*General Purpose I/O Pin User-Configuration Settings*). En la Figura 7.1 se listan los 7 bits de configuración de pines de los *headers* P8/P9.

BIT	AMX335X FIELD	DESCRIPCION
0,1,2	mmode	El modo multiplexador: Los 3 bits menos significantes seleccionan el modo de configuración del pin entre 0 y 7. Por ejemplo: 000=0, 111=7.
3	puden	Habilita la resistencia pull-up o pull-down. Habilitar=1.
4	putypesel	Selecciona el tipo de resistencia pull. Pull-down=0, Pull-up=1.
5	rxactive	Selecciona entre entrada o salida. Habilitación de pin como entrada = 1.
6	slewctrl	Control de velocidad de cambio. Rápido = 0.

Figura 7.1. Tabla de bits de configuración de pines BeagleBone Black, traducido y adaptado del libro *Exploring BeagleBone Tools and Techniques for Building with Embedded Linux*, por Molloy, 2019

De la Figura 7.1 se puede concluir que los tres primeros bits (0-2) establecen uno de los ocho tipos de modos de configuración del pin, el bit 3 habilita la resistencia interna *pull*, el bit 4 selecciona el tipo de resistencia interna (*pull-up* o *pull-down*), el bit 5 indica si el pin es de entrada o salida, y el bit 6 selecciona la velocidad de trabajo del pin (rápido o lento). Esta configuración de pines se refleja en el árbol de dispositivos de Linux (*Linux Device Tree*) la cual usa; para los Kernels de Linux más actualizados, el FDT (*Flattened Device Tree*).

El FTD, según Molloy (2019), es una estructura de data con formato *.dtsi* que describe hardware en la SBC, tal como la CPU, la memoria, buses de comunicación, LEDs USB, y otros. El autor indica también que los archivos FDT son editables y compilables, sin embargo, son complicados y no recomendables para configuraciones *runtime*, por lo que es conveniente optar por el uso de DTOs (*device tree overlays*), que son archivos con formato *.dts*. Un ejemplo sencillo de archivo DTO; donde se configuran solo dos pines del *header* P9, se presenta en la siguiente figura.

```

/* OUTPUT GPIO(mode7) 0x07 pulldown, 0x17 pullup, 0x?f no pullup/down */
/* INPUT GPIO(mode7) 0x27 pulldown, 0x37 pullup, 0x?f no pullup/down */

/dts-v1/;
/plugin/;

/{
    compatible = "ti,beaglebone", "ti,beaglebone-black";
    part-number = "EBB-GPIO-Example";
    version = "00A0";
    fragment@0 {
        target = <&am33xx_pinmux>;

        __overlay__ {
            ebb_example: EBB_GPIO_Example {
                pinctrl-single,pins = <
                    0x070 0x07 // P9_11 $28 GPIO0_30=30 Output Mode7 pulldown
                    0x074 0x37 // P9_13 $29 GPIO0_31=31 Input Mode7 pullup
                >;
            };
        };
    };
    fragment@1 {
        target = <&ocp>;
        __overlay__ {
            gpio_helper {
                compatible = "gpio-of-helper";
                status = "okay";
                pinctrl-names = "default";
                pinctrl-0 = <&ebb_example>;
            };
        };
    };
};

```

*Figura 7.2. Ejemplo de Device Tree Overlay – archivo con formato .dts, del libro **Exploring BeagleBone Tools and Techniques for Building with Embedded Linux**, por Molloy, 2019*

En las líneas en **negrita** del código de la Figura 7.2 se está configurando los pines 11 y 13 del *header* P9. El numero hexadecimal 0x07; que en binario es 0b00000111, está configurando al pin; según la tabla de la Figura 7.1, en modo 7, resistencia *pull* activa y modo *pull-down*, configuración tipo salida rápida. Para la misma línea, el hexadecimal 0x070 hace referencia a la dirección del pin, el cual se observa en la columna ADDR del pin P9_11 en la Figura 7.5.

Los formatos DTO que configuran las capas (*overlays*) del BBB deben modificarse según el diseño del programador, lo siguiente es compilar el archivo. De esta forma, se compila un archivo .dts (*device tree source*) dentro de un archivo .dtbo (*device tree blob object*) mediante el compilador dtc (*device tree compiler*). Se presenta un ejemplo de uso del comando:

```
$ dtc -O dtb -o EBB-GPIO-Example-00A0.dtbo -b 0 -@ EBB-GPIO-Example.dts
```

El archivo resultante (.dtbo) debe ser copiado a la capeta /root/lib/firmware del BeagleBone para que luego este pueda ser manejado por el Administrador de Capas (The BBB Cape Manager). Cada capa está asociada a un archivo .dtbo y pueden ser consideradas como tarjetas de expansión para la configuración de interfaz del BBB, el administrador permite cargar las capas dinámicamente durante la ejecución de cualquier aplicación (*run time*), sin la necesidad de recompilar el kernel de Linux¹⁹. El administrador carga las capas en la variable de entorno (*environment variables*) SLOTS, la cual almacena todas las capas que el BBB establece en *run time*. El comando para cargar la capa .dtbo (como usuario administrador) del ejemplo anterior es:

```
root@beaglebone:/lib/firmware# echo EBB-GPIO-Example > $SLOTS
```

La Figura 7.3 muestra las capas por defecto del BBB, y la Figura 7.4 muestra las capas luego de ejecutar el comando.

```
molloyd@beaglebone:~$ cat $SLOTS
0: 54:PF---
1: 55:PF---
2: 56:PF---
3: 57:PF---
4: ff:P-O-L Bone-LT-eMMC-2G,00A0,Texas Instrument,BB-BONE-EMMC-2G
5: ff:P-O-L Bone-Black-HDMI,00A0,Texas Instrument,BB-BONELT-HDMI
```

Figura 7.3. Capas por defecto del BeagleBone Black, del libro Exploring BeagleBone Tools and Techniques for Building with Embedded Linux, por Molloy, 2019

```
0: 54:PF---
1: 55:PF---
2: 56:PF---
3: 57:PF---
4: ff:P-O-L Bone-LT-eMMC-2G,00A0,Texas Instrument,BB-BONE-EMMC-2G
5: ff:P-O-L Bone-Black-HDMI,00A0,Texas Instrument,BB-BONELT-HDMI
6: ff:P-O-L Override Board Name,00A0,Override Manuf,EBB-GPIO-Example
```

Figura 7.4. Capas del BeagleBone Black, del libro Exploring BeagleBone Tools and Techniques for Building with Embedded Linux, por Molloy, 2019

¹⁹ El administrador de capas del BBB esta implementado en su totalidad en el kernel de Linux pero carga los archivos con formato .dtbo en run time desde el directorio /root/lib/firmware (Molloy, 2019).

Modos de Configuración de pines del BeagleBone Black

Pin	PB Pin	SPINS	ADDR	GPIO	Name	Mode7	Mode6	Mode5	Mode4	Mode3	Mode2	Mode1	Mode0	CPU	Notes
P9_01	P1.15		44e10000		GND										Ground
P9_02	P1.16		Offset from:		GND										Ground
P9_03	P1.14		44e10800		DC_3.3V										250mA Max Current
P9_04					DC_3.3V										250mA Max Current
P9_05	P1.24				VDD_5V										1A Max Current
P9_06					VDD_5V										1A Max Current
P9_07	P1.01				SYS_5V										250mA Max Current
P9_08					SYS_5V										250mA Max Current
P9_09	P2.12				PWR_BTN										5V Level (pulled up PMIC)
P9_10	P2.26				SYS_RESETn								RESET_OUT	A10	
P9_11	P2.05	28	0x870/070	30	UART4_RXD	gpio0[30]	uart4_rxd_mux2	pr1_mi1_col	mmc1_sdcd	rm12_crs_dv	gpmc_csn4	mi12_crs	gpmc_wa10	T17	All GPIOs to 4-6mA output
P9_12	P2.08	30	0x878/078	60	GPIO1_28	gpio1[28]	mcasp0_aclkr_mux3	pr1_mi1_rxlk	gpmc_dir	mmc2_dat3	gpmc_csn6	mi12_col	gpmc_be1n	U18	and approx. 8mA on input.
P9_13	P2.07	29	0x874/074	31	UART4_TXD	gpio0[31]	uart4_txd_mux2	pr1_mi1_bxen	mmc2_sdcd	rm12_rxerr	gpmc_csn5	mi12_rxerr	gpmc_wpn	U17	
P9_14	P2.01	18	0x848/048	50	EHFPMW1A	gpio1[18]	ehrpwm1a_mux1	pr1_mi1_bxd2	gpmc_a18	mmc2_dat1	rgmi2_td3	mi12_bxd3	gpmc_a2	U14	
P9_15	n/a	16	0x840/040	48	GPIO1_16	gpio1[16]	ehrpwm1_tripzone_input	n/a	gpmc_a16	mi12_bxen	rm12_tctl	gmi12_bxen	gpmc_a0	R13	
P9_16	n/a	19	0x84c/04c	51	EHFPMW1B	gpio1[19]	ehrpwm1b_mux1	n/a	gpmc_a19	mmc2_dat2	rgmi2_td2	mi12_bxd2	gpmc_a3	T14	
P9_17	P1.06	87	0x95c/15c	5	I2C1_SCL	gpio0[5]	pr1_edio_data_out1	pr1_edio_data_in1	pr1_uart0_txd	ehrpwm0_synci	I2C1_SCL	mmc2_sdwp	S	A16	
P9_18	P1.12	86	0x958/158	4	I2C1_SDA	gpio0[4]	pr1_edio_data_out0	pr1_edio_data_in0	pr1_uart0_rxd	ehrpwm0_tripzone	I2C1_SDA	mmc1_sdwp	spi0_d1	B16	
P9_19	P1.28	95	0x97c/17c	13	I2C2_SCL	gpio0[13]	pr1_edc_latch1_in	pr1_uart0_rts_n	spi1_cs1	I2C2_SCL	dcant0_rx	timer5	uart1_rtsn	D17	Allocated I2C2
P9_20	P1.26	94	0x978/178	12	I2C2_SDA	gpio0[12]	pr1_edc_latch0_in	pr1_uart0_cts_n	spi1_cs0	I2C2_SDA	dcant0_tx	timer6	uart1_ctsn	D18	Allocated I2C2
P9_21	P1.10	85	0x954/154	3	UART2_TXD	gpio0[3]	EMU3_mux1	pr1_edio_latch_in	pr1_uart0_rts_n	ehrpwm0B	I2C2_SCL	uart2_txd	spi0_d0	B17	
P9_22	P1.08	84	0x950/150	2	UART2_RXD	gpio0[2]	EMU2_mux1	pr1_edio_sof	pr1_uart0_cts_n	ehrpwm0A	I2C2_SDA	uart2_rxd	spi0_sclk	A17	
P9_23	n/a	17	0x844/044	49	GPIO1_17	gpio1[17]	ehrpwm0_sync0	n/a	gpmc_a17	mmc2_dat0	rgmi2_rxdv	gmi12_rxdv	gpmc_a1	V14	
P9_24	P2.09	97	0x984/184	15	UART1_TXD	gpio0[15]	pr1_pru0_pru_r31_16	pr1_uart0_txd	n/a	I2C1_SCL	dcant0_rx	mmc2_sdwp	uart1_txd	D15	
P9_25	P1.29	107	0x9ac/1ac	117	GPIO3_21	gpio3[21]	pr1_pru0_pru_r31_7	pr1_pru0_pru_r30_7	EMU4_mux2	mcasp1_axr1	mcasp0_axr3	eQEP0_strobe	mcasp0_ahclkx	A14	Allocated mcasp0_pins
P9_26	P2.11	96	0x980/180	14	UART1_RXD	gpio0[14]	pr1_pru1_pru_r31_16	pr1_uart0_rxd	n/a	I2C1_SDA	dcant0_tx	mmc1_sdwp	uart1_rxd	D16	
P9_27	P2.34	105	0x9a4/1a4	115	GPIO3_19	gpio3[19]	pr1_pru0_pru_r31_5	pr1_pru0_pru_r30_5	EMU2_mux2	mcasp1_fsx	mcasp0_axr3	eQEP0B_in	mcasp0_fsr	C13	Allocated mcasp0_pins
P9_28	P2.30	103	0x99c/19c	113	SP1_CS0	gpio3[17]	pr1_pru0_pru_r31_3	pr1_pru0_pru_r30_3	eCAP2_in_PWM2_out	spi1_cs0	mcasp0_axr2	ehrpwm0_sync	mcasp0_ahclkx	C12	Allocated mcasp0_pins
P9_29	P1.33	101	0x994/194	111	SP1_D0	gpio3[15]	pr1_pru0_pru_r31_1	pr1_pru0_pru_r30_1	mmc1_sdcd_mux1	spi1_d0	n/a	ehrpwm0B	mcasp0_fex	B13	Allocated mcasp0_pins
P9_30	P2.32	102	0x998/198	112	SP1_D1	gpio3[16]	pr1_pru0_pru_r31_2	pr1_pru0_pru_r30_2	mmc2_sdcd_mux1	spi1_d1	n/a	hrpw m0_tripzor	mcasp0_axr0	D12	Allocated mcasp0_pins
P9_31	P1.36	100	0x990/190	110	SP1_SCLK	gpio3[14]	pr1_pru0_pru_r31_0	pr1_pru0_pru_r30_0	mmc0_sdcd_mux1	spi1_sclk	n/a	ehrpwm0A	mcasp0_acllx	A13	Allocated mcasp0_pins
P9_32	P1.18				VADC										1.8 ADC Volt. Ref.
P9_33	P1.27				AIN4									C8	1.8V input
P9_34	P1.17				AGND										Ground for ADC
P9_35	P1.02				AIN6									A8	1.8V input
P9_36	P2.35				AIN5									B8	1.8V input
P9_37	P1.23				AIN2									B7	1.8V input
P9_38	P1.25				AIN3									A7	1.8V input
P9_39	P1.19				AIN0									B6	1.8V input
P9_40	P1.21				AIN1									C7	1.8V input
P9_41A	P1.20	109	0x964/1b4	20	CLKOUT2	gpio0[20]	EMU3_mux0	pr1_pru0_pru_r31_16	timer7_mux1	clkout2	tc1kin	xdma_event_intr1		D14	Both to P21 of P11
P9_41B	P2.28		0x9a8/1a8	116	GPIO3_20	gpio3[20]	pr1_pru0_pru_r31_6	pr1_pru0_pru_r30_6	emu3	Mcasp1_axr0	n/a	eQEP0_index	mcasp0_axr1	D13	Both to P21 of P11
P9_42A	P2.29	89	0x964/164	7	GPIO0_7	gpio0[7]	xdma_event_intr2	mmc0_sdwp	spi1_sclk	xcap0_ecap_capin_apv	spi1_cs1	uart3_txd	xcAP0_in_PWM0_ou	C18	Both to P22 of P11
P9_42B	P1.31		0x9a0/1a0	114	GPIO3_18	gpio3[18]	pr1_pru0_pru_r31_4	pr1_pru0_pru_r30_4	mmc0_sdwp	Mcasp1_acllx	Mcasp0_axr2	eQEP0A_in	Mcasp0_aclkr	B12	Allocated mcasp0_pins
P9_43	P1.22				GND										- See Pg.50 of the SRM
P9_44	n/a				GND										Ground
P9_45	n/a				GND										Ground
P9_46	n/a	cat		(Mode 7)	GND										Ground
n/a	P1.03			109	USB1_En	gpio3[13]									F15/M14
n/a	P1.30			43	UART0-TX	gpio1[11]	pr1_pru1_pru_r31_15	pr1_pru1_pru_r30_15	eCAP1_in_PWM1_out	I2C2_SCL	dcant0_rx	spi1_cs1	uart0_txd	E16/B12	
n/a	P1.32			42	UART0-RX	gpio1[10]	pr1_pru1_pru_r31_14	pr1_pru1_pru_r30_14	eCAP2_in_PWM2_out	I2C2_SDA	dcant0_tx	spi1_cs0	uart0_rxd	E15/A12	
P9		\$PINS	ADDR +	GPIO NO.	Name	Mode 7						Mode 1	Mode 0	CPU	Notes

Figura 7.5. Header P9 del BeagleBone Black y todas las funcionalidades configurables para sus pines, del libro *Exploring BeagleBone Tools and Techniques for Building with Embedded Linux*, por Molloy, 2019

Pin	PB Pin	\$PINS	ADDR	GPIO	Name	Mode7	Mode6	Mode5	Mode4	Mode3	Mode2	Mode1	Mode0	CPU	Notes
P8_01			Offset from:		DGND										Ground
P8_02			44e10800		DGND										Ground
P8_03	n/a	6	0x818/018	38	GPIO1_6	gpio1[6]						mmc1_dat6	gpmc_ad6	R9	Allocated emmc2
P8_04	n/a	7	0x81c/01c	39	GPIO1_7	gpio1[7]						mmc1_dat7	gpmc_ad7	T9	Allocated emmc2
P8_05	n/a	2	0x808/008	34	GPIO1_2	gpio1[2]						mmc1_dat2	gpmc_ad2	R8	Allocated emmc2
P8_06	n/a	3	0x80c/00c	35	GPIO1_3	gpio1[3]						mmc1_dat3	gpmc_ad3	T8	Allocated emmc2
P8_07	n/a	36	0x890/090	66	TIMER4	gpio2[2]					timer4		gpmc_advn_ale	R7	
P8_08	n/a	37	0x894/094	67	TIMER7	gpio2[3]					timer7		gpmc_oen_ren	T7	
P8_09	n/a	39	0x89c/09c	69	TIMER5	gpio2[5]					timer5		gpmc_be0n_cle	T6	
P8_10	n/a	38	0x898/098	68	TIMER6	gpio2[4]					timer6		gpmc_wen	U6	
P8_11	P2.33	13	0x834/034	45	GPIO1_13	gpio1[13]	pr1_pru0_pru_r30_15	pr1_mii0_bxd1	eQEP2B_in	mmc2_dat1	mmc1_dat5	lcd_data18	gpmc_ad13	R12	
P8_12	P2.24	12	0x830/030	44	GPIO1_12	gpio1[12]	pr1_pru0_pru_r30_14	pr1_mii0_bxd2	EQEP2A_IN	MMC2_DAT0	MMC1_DAT4	LCD_DATA19	GPMC_AD12	T12	
P8_13	P2.03	9	0x824/024	23	BHRPWM2B	gpio0[23]	n/a	pr1_mii0_col	ehrpwm2B	mmc2_dat5	mmc1_dat1	lcd_data22	gpmc_ad9	T10	
P8_14	P1.34	10	0x828/028	26	GPIO0_26	gpio0[26]	n/a	pr1_mii0_bxen	ehrpwm2_tripzone_in	mmc2_dat6	mmc1_dat2	lcd_data21	gpmc_ad10	T11	
P8_15	P2.18	15	0x83c/03c	47	GPIO1_15	gpio1[15]	pr1_pru0_pru_r31_15	pr1_ecap0_ecap_capiw_apwm_o	eQEP2_strobe	mmc2_dat3	mmc1_dat7	lcd_data16	gpmc_ad15	U13	
P8_16	P2.22	14	0x838/038	46	GPIO1_14	gpio1[14]	pr1_pru0_pru_r31_14	pr1_mii0_bxd0	eQEP2_index	mmc2_dat2	mmc1_dat6	lcd_data17	gpmc_ad14	V13	
P8_17	P2.19	11	0x82c/02c	27	GPIO0_27	gpio0[27]	n/a	pr1_mii0_bxd3	ehrpwm0_synco	mmc2_dat7	mmc1_dat3	lcd_data20	gpmc_ad11	U12	
P8_18	P2.17	35	0x88c/08c	65	GPIO2_1	gpio2[1]	mcasp0_fsr	pr1_mdio_mdclk	pr1_mii1_crs	mmc2_clk	gpmc_walt1	lcd_memory_clk	gpmc_clk_mux0	V12	
P8_19	n/a	8	0x820/020	22	BHRPWM2A	gpio0[22]			ehrpwm2A	mmc2_dat4		lcd_data23	gpmc_ad8	U10	
P8_20	n/a	33	0x884/084	63	GPIO1_31	gpio1[31]	pr1_pru1_pru_r31_13	pr1_pru1_pru_r30_13			mmc1_cmd	gpmc_be1n	gpmc_csn2	V9	Allocated emmc2
P8_21	n/a	32	0x880/080	62	GPIO1_30	gpio1[30]	pr1_pru1_pru_r31_12	pr1_pru1_pru_r30_12			mmc1_clk	gpmc_clk	gpmc_csn1	U9	Allocated emmc2
P8_22	n/a	5	0x814/014	37	GPIO1_5	gpio1[5]						mmc1_dat5	gpmc_ad5	V8	Allocated emmc2
P8_23	n/a	4	0x810/010	36	GPIO1_4	gpio1[4]						mmc1_dat4	gpmc_ad4	U8	Allocated emmc2
P8_24	n/a	1	0x804/004	33	GPIO1_1	gpio1[1]						mmc1_dat1	gpmc_ad1	V7	Allocated emmc2
P8_25	n/a	0	0x800/000	32	GPIO1_0	gpio1[0]						mmc1_dat0	gpmc_ad0	U7	Allocated emmc2
P8_26	n/a	31	0x87c/07c	61	GPIO1_29	gpio1[29]							gpmc_csn0	V6	
P8_27	P2.35	56	0x8e0/0e0	86	GPIO2_22	gpio2[22]	pr1_pru1_pru_r31_8	pr1_pru1_pru_r30_8	pr1_edio_data_out2	pr1_edio_data_in2	gpmc_a1	gpmc_a8	lcd_vsync	U5	Allocated HDMI
P8_28	P1.35	58	0x8e8/0e8	88	GPIO2_24	gpio2[24]	pr1_pru1_pru_r31_10	pr1_pru1_pru_r30_10	pr1_edio_data_out4	pr1_edio_data_in4	pru_mii0_crs	gpmc_a10	lcd_pclk	V5	Allocated HDMI
P8_29	P1.02	57	0x8e4/0e4	87	GPIO2_23	gpio2[23]	pr1_pru1_pru_r31_9	pr1_pru1_pru_r30_9	pr1_edio_data_out3	pr1_edio_data_in3	gpmc_a2	gpmc_a9	lcd_hsync	R5	Allocated HDMI
P8_30	P1.04	59	0x8ec/0ec	89	GPIO2_25	gpio2[25]	pr1_pru1_pru_r31_11	pr1_pru1_pru_r30_11	pr1_edio_data_out5	pr1_edio_data_in5	pr1_mii1_crs	gpmc_a11	lcd_ac_bias_en	R6	Allocated HDMI
P8_31	n/a	54	0x8d8/0d8	10	UART5_CTSN	gpio0[10]	uart5_ctsn		uart5_rxd	mcasp0_axr1	eQEP1_index	gpmc_a18	lcd_data14	V4	Allocated HDMI
P8_32	n/a	55	0x8dc/0dc	11	UART5_RTSN	gpio0[11]	uart5_rtsn		mcasp0_axr3	mcasp0_ahclkx	eQEP1_strobe	gpmc_a19	lcd_data15	T5	Allocated HDMI
P8_33	n/a	53	0x8d4/0d4	9	UART4_RTSN	gpio0[9]	uart4_rtsn		mcasp0_axr3	mcasp0_fsr	eQEP1B_in	gpmc_a17	lcd_data13	V3	Allocated HDMI
P8_34	n/a	51	0x8cc/0cc	81	UART3_RTSN	gpio2[17]	uart3_rtsn		mcasp0_axr2	mcasp0_ahclkx	ehrpwm1B	gpmc_a15	lcd_data11	U4	Allocated HDMI
P8_35	n/a	52	0x8d0/0d0	8	UART4_CTSN	gpio0[8]	uart4_ctsn		mcasp0_axr2	mcasp0_aclkr	eQEP1A_in	gpmc_a16	lcd_data12	V2	Allocated HDMI
P8_36	n/a	50	0x8c8/0c8	80	UART3_CTSN	gpio2[16]	uart3_ctsn			mcasp0_axr0	ehrpwm1A	gpmc_a14	lcd_data10	U3	Allocated HDMI
P8_37	n/a	48	0x8c0/0c0	78	UART5_TXD	gpio2[14]	uart2_ctsn		uart5_bxd	mcasp0_aclkr	ehrpwm1_tripzone_in	gpmc_a12	lcd_data8	U1	Allocated HDMI
P8_38	n/a	49	0x8c4/0c4	79	UART5_RXD	gpio2[15]	uart2_rtsn		uart5_rxd	mcasp0_fsx	ehrpwm0_synco	gpmc_a13	lcd_data9	U2	Allocated HDMI
P8_39	n/a	46	0x8b8/0b8	76	GPIO2_12	gpio2[12]	pr1_pru1_pru_r31_6	pr1_pru1_pru_r30_6		eQEP2_index		gpmc_a6	lcd_data6	T3	Allocated HDMI
P8_40	n/a	47	0x8bc/0bc	77	GPIO2_13	gpio2[13]	pr1_pru1_pru_r31_7	pr1_pru1_pru_r30_7	pr1_edio_data_out7	eQEP2_strobe		gpmc_a7	lcd_data7	T4	Allocated HDMI
P8_41	n/a	44	0x8b0/0b0	74	GPIO2_10	gpio2[10]	pr1_pru1_pru_r31_4	pr1_pru1_pru_r30_4		eQEP2A_in		gpmc_a4	lcd_data4	T1	Allocated HDMI
P8_42	n/a	45	0x8b4/0b4	75	GPIO2_11	gpio2[11]	pr1_pru1_pru_r31_5	pr1_pru1_pru_r30_5		eQEP2B_in		gpmc_a5	lcd_data5	T2	Allocated HDMI
P8_43	n/a	42	0x8a8/0a8	72	GPIO2_8	gpio2[8]	pr1_pru1_pru_r31_2	pr1_pru1_pru_r30_2		ehrpwm2_tripzone_in		gpmc_a2	lcd_data2	R3	Allocated HDMI
P8_44	n/a	43	0x8ac/0ac	73	GPIO2_9	gpio2[9]	pr1_pru1_pru_r31_3	pr1_pru1_pru_r30_3		ehrpwm0_synco		gpmc_a3	lcd_data3	R4	Allocated HDMI
P8_45	n/a	40	0x8a0/0a0	70	GPIO2_6	gpio2[6]	pr1_pru1_pru_r31_0	pr1_pru1_pru_r30_0		ehrpwm2A		gpmc_a0	lcd_data0	R1	Allocated HDMI
P8_46	n/a	41	0x8a4/0a4	71	GPIO2_7	gpio2[7]	pr1_pru1_pru_r31_1	pr1_pru1_pru_r30_1		ehrpwm2B		gpmc_a1	lcd_data1	R2	Allocated HDMI
n/a	P2.02			59	GPIO1_27	gpio1[27]	mcasp0_axr1	pr1_mii1_rxer	gpmc_a27	rmii2_rxd0	rgmii2_rd0	gmi2_rxd0	gpmc_a11	V17/T16	
n/a	P2.04			58	GPIO1_26	gpio1[26]	mcasp0_axr0	pr1_mii1_rxdv	gpmc_a26	rmii2_rxd1	rgmii2_rd1	gmi2_rxd1	gpmc_a10	T16/R15	
n/a	P2.06			57	GPIO1_25	gpio1[25]	mcasp0_fsx	pr1_mii1_clk	gpmc_a25	rmii2_crs_dv	rgmii2_rd2	gmi2_rxd2	gpmc_a9	U16/T15	
n/a	P2.10			52	GPIO1_20	gpio1[20]	eQEP1A_in	pr1_mii1_bxd0	gpmc_a20	rmii2_bxd1	rgmii2_td1	gmi2_bxd1	gpmc_a4	R14/R13	
n/a	P2.20			64	GPIO2_0	gpio2[0]	EMU4	pr1_mii0_data	pr1_mii0_crs	mmc2_cmd	rmii2_crs_dv	gpmc_a3	gpmc_csn3	T13/R7	
n/a	P2.25			41	SPI1-MOSI	gpio1[9]	pr1_edc_sync1_out	spi1_cs0	spi1_d1	I2C1_SCL	dcan1_rx	uart4_bxd	uart0_rtsn	E17/C13	
n/a	P2.27			40	SPI1-MISO	gpio1[8]	pr1_edc_sync0_out	timer7	spi1_d0	I2C1_SDA	dcan1_tx	uart4_rxd	uart0_ctsn	E18/C12	
n/a	P2.31			19	SPI1-CS	gpio0[19]	EMU2	pr1_pru1_pru_r31_16	spi1_cs1	clkout1	timer4	n/a	xdma_event_intr0	A15/A4	
P8 Header		cat \$PINS	ADDR +	GPIO NO.	Name	Mode 7	Mode 6	Mode 5	Mode 4	Mode 3	Mode 2	Mode 1	Mode 0	CPU	

Figura 7.6. Header P8 del BeagleBone Black y todas las funcionalidades configurables para sus pines, del libro *Exploring BeagleBone Tools and Techniques for Building with Embedded Linux*, por Molloy, 2019