



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA
INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE
UNA CERVECERÍA ARTESANAL
GEOTÉRMICA**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Brayan González Hernández

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Héctor Miguel Aviña Jiménez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

Agradecimientos

A mis queridos padres, quienes han sido mi apoyo constante en cada etapa académica y en cada paso de mi vida.

A mis hermanos, quienes han sido mi inspiración constante y motivación.

A mis abuelas y abuelos, quienes siempre me alentaron a crecer profesionalmente y a alcanzar mis metas.

A Andría, quien ha sido mi apoyo emocional, brindándome su delicadeza y amor.

A mi Tía Silvia, por su compañía constante y apoyo inquebrantable.

A mis amigos: Guati, Monti, Emanuel, Rafa, Jaqueline, Noel, quienes me acompañaron en esta etapa universitaria.

A Hugo Barrios, por brindarme sus valiosos consejos y hospitalidad.

A Gina y Gazvani, por sus revisiones y comentarios en la redacción de este trabajo.

A mi equipo de trabajo del grupo IIDEA, quienes me respaldaron en la creación de la cerveza y compartieron esta experiencia.

Al Especialista en Ingeniería Daniel González, por ser un gran mentor y apoyarme en la elaboración de esta tesis.

A mis sinodales: Dr. Edmundo Rocha, Dr. Héctor Aviña, Dr. Rodrigo Alarcón, Ing. Raymundo Gaytán, por sus comentarios y sugerencias.

A mis amigos del grupo IIDEA, quienes me permitieron convivir y disfrutar grandes momentos en el laboratorio.

Al grupo IIDEA, por darme la oportunidad de demostrar mi empeño como ingeniero y por proporcionarme las herramientas necesarias para esta tesis.

A mis profesores de la facultad, quienes compartieron su sabiduría y enseñanzas valiosas.

A la UNAM, por ser la universidad que me formó como ingeniero y me dio las bases para mi desarrollo profesional.

¡Gracias, gracias, gracias!

Índice

Nomenclatura	6
Resumen	7
Objetivo general	9
Objetivos específicos	9
Planteamiento del problema	10
Introducción	11
1. Elaboración de cerveza artesanal aplicando geotermia	13
1.1. Energía geotérmica	13
1.2. Sistemas geotérmicos	14
1.3. Usos directos de la energía geotérmica	15
1.4. Proceso de elaboración de cerveza artesanal	17
1.4.1. Proceso de malteado	19
1.4.2. Proceso de molienda	21
1.4.3. Proceso de maceración	22
1.4.4. Proceso de hervor	22
1.4.5. Proceso de fermentación	23
1.4.6. Proceso de carbonatación	26
2. Marco teórico	29
2.1. Sistemas analógicos y digitales	29
2.2. Sistema de control de lazo cerrado	30
2.2.1. Control Proporcional	31
2.2.2. Control Proporcional Derivativo	32
2.2.3. Control Proporcional Integral Derivativo	33
2.3. Cálculo de parámetros K_p , K_i y K_d	35
2.4. Modulación por ancho de pulsos	38
2.5. Controlador Lógico Programable	39
2.6. Interfaz Hombre-Máquina	41
2.7. Instrumentos de control	42
2.7.1. Transductor	43
2.7.2. Detector de temperatura resistivo	44
2.7.3. Fluviómetro	45

2.7.4.	Válvulas digitales y de control	47
2.7.5.	Sensor de nivel	48
2.7.6.	Relé de estado sólido	49
3.	Proceso de control e instrumentación de cervecera artesanal geotérmica	52
3.1.	Diagrama de tuberías e instrumentación	52
3.2.	Selección de equipos	57
3.2.1.	Lista de instrumentos	57
3.2.2.	Lista de dispositivos de control	58
3.2.3.	Lista de señales	58
3.3.	Filosofía de operación	59
3.3.1.	Llenado del sistema	59
3.3.2.	Precautado	59
3.3.3.	Maceración	61
3.3.4.	Hervor	62
3.3.5.	Enfriamiento	62
3.4.	Especificación de instrumentos	63
3.5.	Diseño de tablero de control	66
3.5.1.	Diagrama trifilar eléctrico	67
3.5.2.	Análisis de cargas y protecciones eléctricas	69
4.	Implementación de la instrumentación y el control de la cervecera artesanal geotérmica	73
4.1.	Ensamble del tablero de control	73
4.2.	Instalación del sistema de instrumentación y control	75
4.3.	Programación de instrumentos de monitoreo	77
4.3.1.	Sensores de temperatura y presión	77
4.3.2.	Sensores de flujo	79
4.4.	Control de calidad	84
4.4.1.	Resultados de calibración de sensores de temperatura	84
4.4.2.	Resultados de calibración de sensores de presión	85
4.5.	Filosofía de control	86
4.5.1.	Modo de operación	86
4.5.2.	Control de bombas	86
4.5.3.	Control de válvulas	86

4.5.4. Secuencias	86
4.5.4.1. Secuencia de llenado	87
4.5.4.2. Secuencia de precalentamiento	88
4.5.4.3. Secuencia de maceración	89
4.5.4.4. Secuencia de hervor	90
4.5.4.5. Secuencia de enfriamiento	91
4.5.4.6. Secuencia de limpieza	92
4.5.5. Alarmas	93
4.5.5.1. Filosofía de alarmas	93
4.6. Programación de las secuencias de la cerveza artesanal	93
4.6.1. Programación secuencia de llenado	93
4.6.1.1. Secuencia de llenado en HMI	95
4.6.1.2. Manual de secuencia de llenado	96
4.6.2. Programación secuencia de precalentado	96
4.6.2.1. Secuencia de precalentado en HMI	103
4.6.2.2. Manual de secuencia de precalentado	104
4.6.3. Programación secuencia de maceración	105
4.6.3.1. Secuencia de maceración en HMI	107
4.6.3.2. Manual de secuencia de maceración	108
4.6.4. Programación secuencia de hervor	109
4.6.4.1. Secuencia de hervor en HMI	112
4.6.4.2. Manual de secuencia de hervor	113
4.6.5. Programación secuencia de enfriamiento	113
4.6.5.1. Secuencia de enfriamiento en HMI	114
4.6.5.2. Manual de secuencia de enfriamiento	115
4.6.6. Programación secuencia de limpieza	116
4.6.6.1. Secuencia de limpieza en HMI	118
4.6.6.2. Manual de secuencia de limpieza	120
4.7. Resultados	121
4.7.1. Resultados de documentos de diseño e ingeniería	124
4.7.2. Resultados de llenado de sistema	127

4.7.3.	Resultados de precalentado	128
4.7.4.	Resultados de maceración	129
4.7.5.	Resultados de hervor	131
4.7.6.	Resultados de enfriamiento	132
4.7.7.	Resultados de limpieza	133
4.7.8.	Costos de instalación de la instrumentación y control del sistema	134
4.7.9.	Producto final del proceso de producción de cerveza	135
5.	Conclusiones	137
6.	Bibliografía	139
7.	Anexos	144
7.1.	Tablas de protección de equipos	144
7.2.	Diagrama de Flujo y de Proceso	145
7.3.	Diagrama de tuberías e instrumentación	146
7.4.	Hojas de datos de instrumentos	147
7.4.1.	Hojas de datos de indicadores de presión	147
7.4.2.	Hojas de datos de indicadores de temperatura	148
7.4.3.	Hojas de datos de transmisor de flujo	149
7.4.4.	Hojas de datos de transmisor de temperatura	150
7.4.5.	Hojas de datos de transmisor de presión	151
7.4.6.	Hojas de datos de válvulas de control	152
7.4.7.	Hojas de datos de válvulas solenoides	153
7.4.8.	Hojas de datos de interruptores de corriente	154
7.5.	Hojas de calibración de sensores de temperatura	155
7.6.	Hojas de calibración de sensores de presión	164
7.7.	Diagrama trifilar eléctrico	169
7.8.	Diseño de calibrador de temperatura	170
7.8.1.	Cálculos para la creación del circuito del horno	170
7.8.2.	Diseño del circuito eléctrico	171
7.8.3.	Programación de controlador PID	173
7.9.	Calibración de sensores de presión	175
8.	Glosario	¡Error! Marcador no definido.
9.	Índice de imágenes	176

10. Índice de tablas

179

Nomenclatura

ANSI	Instituto Americano de Estándares Nacionales
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
DFP	Diagrama de flujo y de proceso
DTI	Diagrama de tuberías e instrumentación
HP	Caballos de fuerza
IP	Protección de ingreso
ISA	Sociedad Internacional de Automatización
ISO	Organización Internacional de Normalización
NOM	Norma Oficial Mexicana
PCG	Planta Cervecera Geotérmica
PID	Proporcional, integral y derivador

Resumen

La geotermia es una forma de energía renovable que aprovecha el calor almacenado en el interior de la Tierra. Se trata de una fuente energética abundante y constante, que puede ser utilizada de manera directa en diversos ámbitos. Cuando hablamos de un uso, nos referimos a la utilización directa del calor almacenado en el subsuelo de la Tierra con fines prácticos sin la necesidad de una conversión significativa de energía; ejemplos de esto es la calefacción, la deshidratación de alimentos, la desalinización del agua, entre otros. En este trabajo, se ha abordado el diseño y la implementación de la instrumentación y el control de un prototipo de una cervecería geotérmica. Al ser un prototipo de laboratorio no podemos añadir directamente la geotermia, pero se optó por hacer la simulación del recurso geotérmico.

Para simular el recurso geotérmico, se requiere de un recipiente y de una resistencia eléctrica gracias a los cuales pudimos calentar nuestra agua a temperaturas mayores de 100°C a través de un circuito cerrado de tuberías, con esto el sistema ya puede presentar evidencias para que en un sistema industrial trabaje con energía geotérmica, dando así la producción de cerveza artesanal. Se utilizan métodos de control clásico con el PID para mantener dentro de los límites la temperatura y la presión, garantizando el funcionamiento óptimo y la protección del equipo.

El proceso requirió la elaboración de documentos de ingeniería básica y de detalle, que incluyen el diagrama de tuberías e instrumentación necesario para la instalación de la cervecería geotérmica. Además, se diseñó un tablero de control que permite supervisar y regular el funcionamiento de la planta. Estos elementos permitieron elaborar una filosofía de operación clara y precisa.

La programación del controlador lógico programable se realizó mediante la creación de diagramas de escalera. En éste se incorporaron controladores PID y ON/OFF, contadores rápidos y dispositivos de monitoreo y control, como instrumentos de temperatura y presión sometidos a un control de calidad.

Finalmente, se llevaron a cabo pruebas de operación del sistema para garantizar el correcto funcionamiento en la producción de cerveza artesanal. Aunque se utilizó la automatización en

ciertos aspectos, la elaboración de la cerveza artesanal aún requiere de mano de obra y conocimiento humano para llevar a cabo las secuencias adecuadas.

Para lograr los fines de esta tesis, se organiza el documento en cuatro capítulos. En el primer capítulo se define la energía geotérmica y se caracterizan los procesos de elaboración de la cerveza artesanal. Posteriormente, en el segundo capítulo se caracterizan los conceptos teóricos que nos ayudarán a implementar la instrumentación y el control de la cervecería geotérmica. Después, en el tercer capítulo se describen los documentos de ingeniería de diseño y de detalle creados para nuestro fin. Por último, en el cuarto capítulo se lleva a cabo la implementación de la instrumentación y el control de la cervecería.

Objetivo general

Diseñar e implementar el sistema de instrumentación y control del prototipo de una cervecería artesanal geotérmica.

Objetivos específicos

- Elaborar los documentos del prototipo de cervecería operada con geotermia, los cuales son: filosofía de operación del proceso, criterios de diseño, especificaciones de los instrumentos, diagrama de flujo del proceso, diagrama de tuberías e instrumentación, listas de instrumentos, diagrama eléctrico, arquitectura de control y memoria de cálculo.
- Elaborar los documentos de ingeniería de detalle incluyendo: típicos de instalación, plano del tablero eléctrico y de control, diagramas de interconexión, diagramas de escalera, lista final de materiales.
- Implementar el sistema de instrumentación y control en el proceso de la cerveza artesanal geotérmica, realizando pruebas preoperativas y puesta en marcha.
- Plantear la automatización del proceso de la cervecera artesanal geotérmica con el uso de un controlador lógico programable.
- Controlar la temperatura y el flujo del sistema.
- Verificar el funcionamiento del prototipo a través pruebas y de análisis de resultados.

Planteamiento del problema

La cervecería artesanal requiere de una cantidad significativa de energía para llevar a cabo sus procesos de producción, lo que resulta en altos costos económicos en la utilización de energía eléctrica y gas.

Se plantea utilizar la energía geotérmica para llevar a cabo la producción de la cerveza artesanal con energía renovable; lo cual representa muchas ventajas debido a que se dejarán de producir emisiones de CO₂ por el aprovechamiento de energía térmica, además de obtener grandes ahorros en consumo de energía.

Sin embargo, el uso de la energía geotérmica en una fábrica de cerveza artesanal requiere una solución técnica adecuada que pueda controlar y automatizar los procesos de producción y garantizar la calidad y consistencia de la cerveza producida.

Por lo tanto, el problema a resolver es cómo integrar la energía geotérmica en los procesos de producción de la fábrica de cerveza artesanal de manera efectiva y eficiente, para reducir los costos de energía y mejorar la sostenibilidad ambiental mientras se mantiene la calidad y consistencia del producto final.

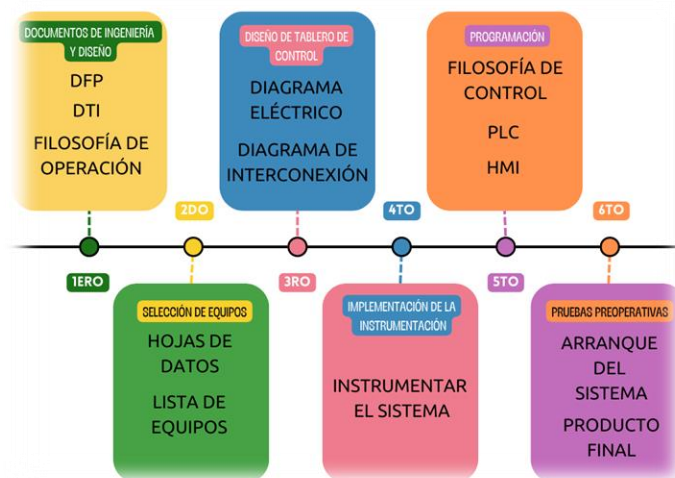
Introducción

La geotermia, una fuente de energía renovable, es un recurso valioso que se basa en la explotación del calor almacenado en el interior de la Tierra. Su aplicación más común ha sido la generación de energía eléctrica, pero su potencial se extiende mucho más allá de esta función primaria. De hecho, la geotermia puede ser aprovechada de manera directa en una variedad de aplicaciones, como: balnearios, agricultura, invernaderos y más. En este contexto, el propósito de esta tesis es presentar el desarrollo de un prototipo de una cervecería geotérmica que se llevará a cabo en el laboratorio de geotermia del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Para lograr este objetivo, seguiremos una secuencia de pasos meticulosamente planificados, que se detallan en la **Ilustración 1**.

Ilustración 1

Serie de pasos para la elaboración de la cervecería



La primera etapa del proyecto implica la elaboración de documentos de ingeniería y de detalle, esto es para planificar y documentar cada aspecto del diseño y la implementación de la cervecería. Esta fase establece las bases sólidas sobre las cuales se construirá todo el proyecto.

Luego, se procederá a la selección de los equipos, para asegurar que se utilicen los componentes adecuados que cumplan con los requisitos específicos. La elección de estos equipos es esencial para garantizar el funcionamiento eficiente y seguro de la instalación.

El diseño del tablero de monitoreo y control es otra etapa clave en el proceso. Esto incluye la planificación de cómo se supervisará y regulará cada aspecto de la cervecería, asegurando un monitoreo y control preciso de los parámetros durante todo el proceso de producción.

Una vez completado el diseño, se procederá a la implementación de la instrumentación y la programación de los controladores. Esto implica la instalación física de los dispositivos y la configuración de los actuadores.

Finalmente, el proyecto culminará con pruebas operativas para garantizar que todo funcione según lo previsto. Este paso es crucial para detectar y corregir posibles problemas antes de que la planta entre en pleno funcionamiento. Cada uno de estos pasos será detallado en los capítulos subsiguientes de esta tesis, ofreciendo una visión completa del proceso de desarrollo y conduciéndonos hacia la culminación de un producto final: la elaboración de cerveza artesanal impulsada por energía geotérmica.

1. Elaboración de cerveza artesanal aplicando geotermia

En este capítulo se da una breve introducción acerca de la energía geotérmica, conociendo en dónde podemos encontrar este tipo de energía. Además, se aborda el procedimiento de elaboración de la cerveza artesanal y se explica cada etapa del proceso de manera detallada para resaltar lo que se va a controlar e instrumentar.

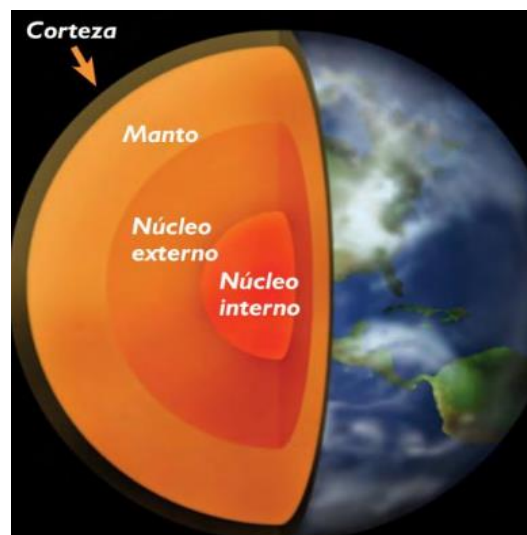
1.1. Energía geotérmica

En líneas generales, el término *geotermia* se refiere a la energía térmica que se encuentra naturalmente en el interior de la Tierra. En la práctica, el vocablo se refiere al estudio y uso de la energía térmica que se transporta a través de la roca y/o fluidos, moviéndose desde el interior de la corteza terrestre hasta la superficie, lo que da origen a los sistemas geotérmicos (Peña Baños, 2020).

La geotermia es una rama de la geología y de la geofísica dedicada a estudiar las diferencias de temperatura de la corteza terrestre, además de los fenómenos naturales ocasionados por la distribución de flujos térmicos, en la **Ilustración 2** podemos apreciar las distintas capas de nuestro planeta; mientras más avancemos al interior de la Tierra, las temperaturas serán más altas (Núñez, 2008).

Ilustración 2

Capas de la Tierra (Clifford, 2007)



La energía térmica que se origina en el interior de la Tierra se presenta indirectamente a través de varios fenómenos, como el vulcanismo, los gradientes térmicos en el suelo, el movimiento de las placas tectónicas y las emisiones geotérmicas superficiales como: la lava, las pozas de lodo hirviendo, las fumarolas, los géiseres y las aguas termales. Sin embargo, a diferencia de la energía solar y eólica, la energía geotérmica es poco conocida y no se percibe de manera generalizada, ya que se encuentra bajo tierra y sólo se manifiesta en zonas específicas, como se observa en la **Ilustración 3** (Pérez González, 2023). También se puede apreciar que en México se presenta geotermia de alta entalpia y por eso se puede aprovechar este recurso.

Ilustración 3

Representación geográfica de la clasificación geotérmica en el mundo (Hiriart Le Bert, 2008)



1.2. Sistemas geotérmicos

Se puede considerar un sistema geotérmico como el vapor del agua en la corteza superior de la Tierra, la cual, en un espacio recluso, puede ser capaz de transferir calor por una abertura a la superficie (Vicente, 2014) . Este sistema está compuesto por tres elementos:

- **Fuente de calor:** Se da por una **intrusión**¹ magmática a muy alta temperatura (más de 600 °C) desplazada a profundidades **somer**² de 5 a 15 km.
- **Yacimientos:** Se trata de rocas calientes cuya función es extraer el calor de los fluidos circulantes.

¹ Afluencia o infiltración de una masa magmática entre dos estratos sólidos, o a través de ellos, sin alcanzar la superficie terrestre.

² Que es poco profundo o que está muy cerca de la superficie.

- **Fluido:** En la mayoría de los casos es agua encontrada en su estado líquido o gaseoso dependiendo de la temperatura y presión.

Así, el calor se transfiere a través de estos medios.

De acuerdo con el nivel térmico de dicho recurso, obtenemos la siguiente clasificación de los sistemas geotérmicos:

- Temperatura mayor a 150°C, se considera geotermia a alta temperatura y se usa para la producción de energía eléctrica.
- Temperatura de 90°C a 150°C, se considera geotermia a media temperatura y se usa para la producción de energía eléctrica mediante el uso de plantas de ciclo binario.
- Temperatura de 25°C a 90°C, se considera geotermia a baja temperatura y se usa para la calefacción de viviendas, procesos industriales y usos agrícolas.
- Temperatura menor a 25°C, se considera geotermia a muy baja temperatura y se usa para agua caliente sanitaria y aire acondicionado con el empleo de bombas de calor (Andraca Gutiérrez, 2012).

1.3. Usos directos de la energía geotérmica

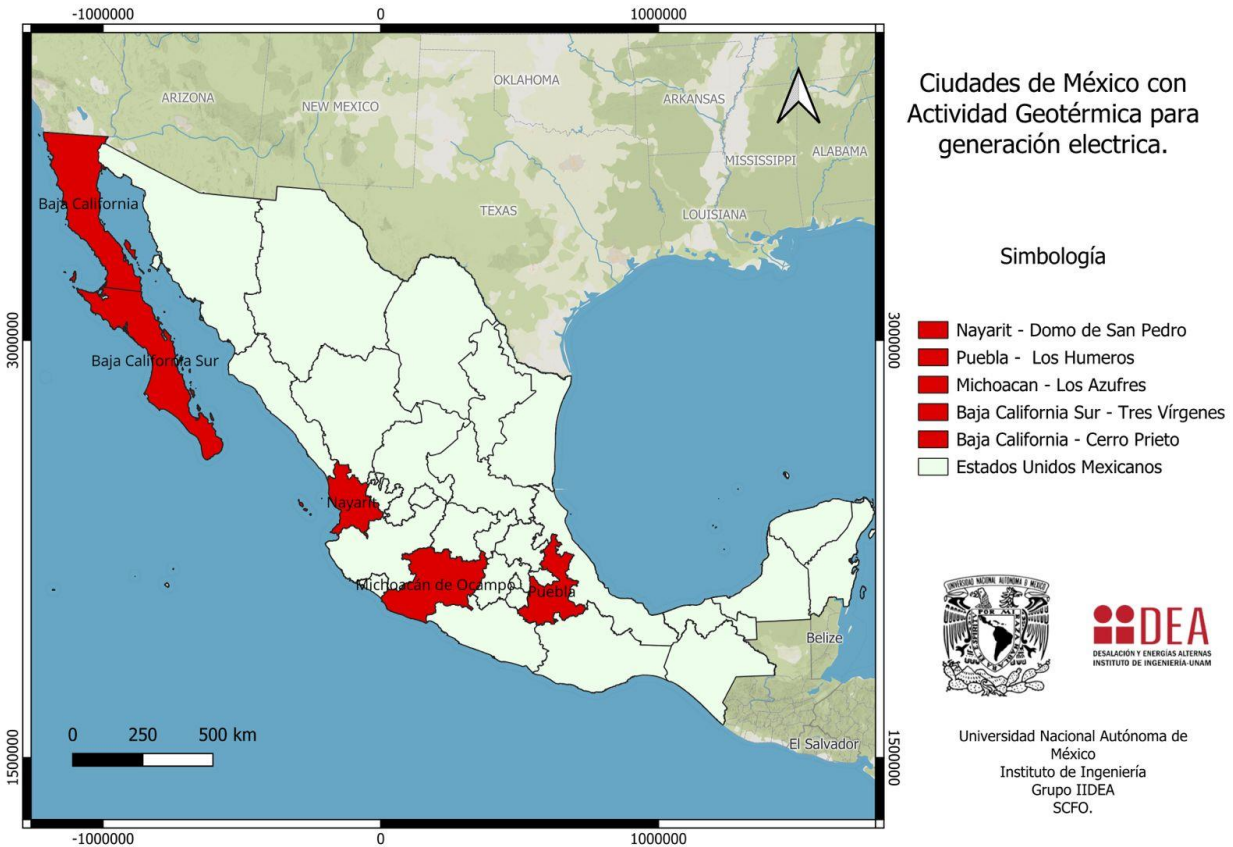
La energía geotérmica puede utilizarse directamente para usos domésticos, industriales y agrícolas sin necesidad de convertirla en electricidad. Algunos ejemplos de los usos directos de la energía geotérmica son:

- **Calefacción y refrigeración:** La energía geotérmica puede emplearse para calentar y enfriar edificios y viviendas. En invierno, se extrae el calor del suelo y se utiliza para calentar los interiores de los edificios. En verano, se invierte el proceso y se utiliza el suelo como fuente de refrigeración.
- **Baños termales y spas:** Las aguas termales que contienen agua caliente procedente de las capas geotérmicas se presentan en balnearios y spas para la relajación y tratamiento de enfermedades.
- **Agricultura:** La energía geotérmica se aplica para calentar invernaderos y mejorar el crecimiento de plantas y cultivos. Además, se pueden utilizar fuentes geotérmicas para irrigación, esterilización del suelo y cultivo de peces en acuicultura.

conocimiento geográfico del país es posible seguir realizando estudios de geotermia gracias a la exploración de las regiones, lo cual resulta vital para desarrollar nuevas tecnologías.

Ilustración 5

Ciudades de la república mexicana con actividad geotérmica para generación eléctrica (IIDEA, 2023)



1.4. Proceso de elaboración de cerveza artesanal

La cerveza es toda bebida fermentada que contiene levadura, **lúpulo**³, **malta**⁴ y agua. Es una bebida muy popular en el mundo, su origen proviene desde el nacimiento de la agricultura en los años 4,000 a 3,500 a.C. (Thebeerbox, 2009), cuando los primeros babilonios dejaron las recetas

³ Son las partes secas y con flores de la planta del lúpulo.

⁴ Es un cereal derivado de la cebada o el trigo.

de cerveza de cebada. Posteriormente, se agregó a la cerveza varios ingredientes (laurel, salvia y miel); con ellos, los sabores se hicieron muy dulces, parecidos al pulque.

Pero fue en Alemania en el siglo IX cuando se empezaba a implementar el lúpulo (ECA, 2017). Justamente, uno de los países más afamados y productores de cerveza es Alemania, donde incluso se celebra una fiesta anual llamada Oktoberfest (“Fiesta de Octubre”) en la ciudad de Múnich, como se aprecia en la **Ilustración 6**, donde se sirve solamente cerveza con un fuerte aroma y color cobrizo llamada märzembier (“cerveza de marzo”), que constituye la manifestación cervecera más importante del mundo (ECA, 2017).

Ilustración 6

Oktoberfest Alemania 2017 (ECA, 2017)



La cerveza se puede encontrar en distintos sabores, olores, colores, etc. Como se observa en la **Ilustración 7**, el color está ligado al tostado en el proceso de la transformación de cebada en malta, que hace aparecer caramelos. Asimismo, el color se vincula con el proceso de producción. Así, las cervezas pueden clasificarse en dos grandes grupos: las oscuras y las claras. Por un lado, el tono de las cervezas oscuras va del ámbar claro al negro opaco; cuanto más tiempo se tuesta la malta, más coloración otorga a la cerveza y le da un sabor especial (Suárez, 2013).

Por otro lado, las cervezas claras, un poco pálidas, se distinguen por su amargor. Este tipo de cerveza es el más difundido en el mundo y generalmente es de baja fermentación, por lo cual es bastante ligera y muy fresca. Pero existen también cervezas claras de fermentación alta.

Ilustración 7

Colores de Cervezas (Suárez, 2013)



Actualmente se estima que existen más de 10,000 fábricas de cervezas artesanales en el mundo. A esta cantidad se suman fábricas caseras cuyo número no se ha estimado todavía.

Ahora bien, para elaborar cerveza artesanal se llevan a cabo una serie de procesos que se describen a continuación.

1.4.1. Proceso de malteado

El malteado es el primer proceso de la elaboración de la cerveza artesanal. En este proceso se trabaja con la cebada a través de tres pasos. El primer paso consiste en la germinación de la cebada, la cual se somete a un remojo lento a temperaturas entre los 12 y 15 °C durante dos o tres días, como se muestra en la **Ilustración 8**. Posteriormente pasa a una fase de descanso, donde se retira el agua y los granos drenados reposan con unas condiciones de humedad y temperatura idóneas en un lapso de 24 hrs. Estas condiciones facilitarían la germinación, que constituye el último paso (Fernández, 2021).

Ilustración 8

Cebada en agua (Artesanal, s.f.)



En la germinación se reparte el grano de forma uniforme y extendida, con unas condiciones de humedad y ventilación adecuadas, para que el embrión comience a germinar y el grano empiece a sufrir su modificación como se observa en la **Ilustración 9**. El proceso de modificación del grano consiste en la descomposición de sus proteínas y carbohidratos, preparando al grano para su posterior uso en la elaboración de cerveza. Esta fase tiene una duración aproximada de cinco días, tras los cuales se obtiene la denominada *malta verde* (Ultrasonics, 2021).

Ilustración 9

Germinación de cebada (Fernández, 2021)



Por último, se llega al paso del secado-tostado donde la “malta verde” se somete a los hornos de secado. Este proceso detiene la germinación del grano y reduce la humedad hasta un 4%. El horno debe encontrarse a una temperatura de 80 a 90 °C durante 2 o 3 horas, como se ve en la **Ilustración 10**. Cuanto mayor y más intensa sea la duración de la fase de secado y tostado, menor será la capacidad enzimática de la malta, por lo que la duración de esta fase dependerá del tipo de malta que se desee obtener.

Una vez secado el grano, se procede a retirar las raíces y tallos que se pudieron desarrollar durante la germinación, y la malta ya se encuentra lista para su uso.

Ilustración 10

"Malta verde" en horno de secado (Ultrasonics, 2021)



1.4.2. Proceso de molienda

Una vez que estén los granos secos, se pasa al procedimiento de molienda; este proceso consiste en romper el grano respetando la cáscara o envoltura provocando la pulverización de la harina (Ferreyra, 2018).

Existen tres tipos de molindas:

- **En seco:** Cuando se realiza la molienda en seco, se muele el grano entero, incluyendo la cascarilla. La molienda seca se almacena en depósitos intermedios antes de ser añadidos a la cuba de maceración.
- **Con sistema de humectación de cascarilla:** Consiste en humedecer la malta antes de molerla para hacer su cáscara más flexible, lo que permite que pueda pasar fácilmente por la máquina de molido.
- **Húmeda:** Es el sistema clásico de molienda en húmedo, la malta es previamente remojada con agua a una temperatura entre 30 °C y 50 °C. Posteriormente se pasa el grano por un molino de un solo par de rodillos, como se percibe en la **Ilustración 11**. Después de la molienda del grano, la harina resultante se mezcla con agua y se envía directamente a la cuba de empaste o maceración. La ventaja de la molienda húmeda es que da como resultado una combinación de cáscara entera y partículas más pequeñas de **endospermo**⁵ que acelera el proceso de macerado y facilita la obtención de extractos más altos (Ferreyra, 2018).

Ilustración 11

Molino de malta (Ferreyra, 2018)



⁵ Tejido nutricional formado en el saco embrionario de las plantas con semillas.

1.4.3. Proceso de maceración

Este procedimiento consiste en que, una vez molida la malta, se lleva a un recipiente que se mezclará con agua que se encuentra entre los 65 °C y 75 °C; con este procedimiento se eliminan los almidones de los granos y se extraen los azúcares de la malta. El resultado final de este procedimiento se llama *mosto de malta* (Ferreyra, 2018).

El mosto se filtra -como se observa en la **Ilustración 12**- y deja los azúcares en la mezcla para que después éstos sean consumidos por la levadura durante la fermentación. Estos azúcares van a definir la cantidad de alcohol presente en la bebida, el cuerpo y la sensación de la cerveza.

Ilustración 12

Filtrado de mosto (Pablo, 2020)



En este paso es primordial el control de la temperatura, ya que las temperaturas menores de 63°C afectarán la tasa de conversión enzimática y se daña la producción; en caso de que las temperaturas sean muy altas, éstas afectarán el cuerpo de la cerveza; además, se añaden **taninos**⁶, que provocan un amargor en la cerveza (Casera, 2015).

Lo ideal en este procedimiento es que antes de realizar una producción, se tenga clara la temperatura que se mantendrá al llegar a este paso.

1.4.4. Proceso de hervor

El siguiente procedimiento consiste en llevar el mosto a su punto de ebullición, que es aproximadamente de 100 °C. En la **Ilustración 13** se aprecia la malta hervida. La ebullición puede ser a más temperatura, pero va a depender de los términos de los azúcares. También es importante

⁶ Son unos compuestos fenólicos que se acumulan en las frutas y las cortezas de plantas y árboles, presentando un olor muy característico además de un sabor amargo y seco en la boca.

tener un poco de ventilación durante el proceso, ya que permitirá que los compuestos de sulfuro se evaporen y así se evitarán malos sabores en el resultado final. Otra consideración en este paso es que debemos evitar que se derrame el líquido, ya que si llega a suceder esto, afectará la espuma de nuestra cerveza (cerveceros, 2017).

Ilustración 13

Malta hervida (Artesanal, s.f.)



El tiempo de hervor del mosto es de 60 minutos aproximadamente, pero dependerá de la receta que se quiera implementar.

Ahora, durante el tiempo de hervor se agrega el lúpulo de amargor, lo que permitirá que la cerveza tenga un amargor apropiado. Cuando haya pasado la hora del proceso, se debe esperar 30 minutos controlando la temperatura para tener un hervor vigoroso. Una vez pasado el tiempo, se agregan lúpulos de sabor -que son distintos al de amargor por la cantidad de ácidos contenidos en ellos- y de nuevo se deben esperar 20 minutos para agregar los últimos lúpulos de aroma (cerveceros, 2017).

Una vez terminado el proceso de hervor, el mosto debe enfriarse lo más rápido posible (aproximadamente a menos de 10°C) para avanzar al proceso de fermentación. El enfriamiento puede ser llevado a cabo con un intercambiador de calor.

1.4.5. Proceso de fermentación

La fermentación es el proceso más importante en la elaboración de la cerveza. En este procedimiento, la levadura convierte el mosto en etanol y dióxido de carbono para llegar al resultado final, que sería la cerveza. Se comienza llevando la preparación del mosto en un tanque cilíndrico llamado fermentador isobárico, como el presentado en la **Ilustración 14**.

Ilustración 14

Fermentadores isobáricos donde se contiene el mosto para agregar la levadura (Casera, 2015)



En este paso van a intervenir tres factores que se deben considerar esencialmente para llevar a cabo una buena fermentación (Casera, 2015):

- **Levadura:** La levadura es un hongo unicelular que transforma los azúcares en alcohol. Existen dos tipos de levadura que se pueden implementar en la cerveza, **Saccharomyces Cerevisiae**⁷ y **Saccharomyces pastorianus**⁸, aunque también se habla de las levaduras y bacterias que provienen del medio ambiente; a este proceso de fermentación se le llama *espontánea*.
- **Calidad del mosto:** En cuanto a la calidad del mosto, se requiere que cumpla con dos condiciones para llevar a cabo la fermentación de manera adecuada:
 - Primero, debe proveer oxígeno a través de la **aireación**⁹, ya que esto es fundamental para el crecimiento de la levadura.
 - Segundo, debe contener los nutrientes necesarios para que la levadura pueda producir células vigorosas, como son: riboflavina, inositol, biotina, fósforo, azufre, hierro, cobre, potasio, sodio y zinc.
- **Temperatura:** Dependiendo de la levadura y también de la temperatura, las cervezas pueden clasificarse en dos tipos:

⁷ Es un hongo unicelular, un tipo de levadura utilizado industrialmente en la fabricación de pan, cerveza y vino.

⁸ Es un tipo de levadura para la elaboración de cerveza descubierto y empleado por la gran industria danesa de cerveza denominada Carlsberg, hoy en día se emplea esta levadura en la investigación de ciertos procesos de la Glucólisis.

⁹ Se refiere a la medida del volumen de espacio poroso en un sustrato ocupado por el aire después de que se satura y se le permite drenar.

- **Ales:** Son las cervezas de alta fermentación, que se deben refrigerar a una temperatura entre los 15 y 25 °C.
- **Lager:** Son las cervezas de baja fermentación, que se deben mantener en una temperatura entre los 5 y 9 °C.

El cuidado de la temperatura de la fermentación de la cerveza es fundamental ya que se ve bastante afectada. De esta manera, si tenemos demasiado frío, la levadura puede estar inactiva y, al contrario, si las temperaturas son muy altas, se puede producir un alto nivel de **diacetilo**¹⁰ (Levabeer, 2019).

La fermentación requiere de una hasta dos semanas para llevar a cabo el proceso y éste se divide en cuatro etapas:

- **Primera etapa:** Se realiza durante las primeras 15 horas del proceso, esta primera etapa consiste en incorporar la levadura al mosto, ya que ésta depende de un tiempo de aclimatación. Mientras tanto, la levadura absorberá el oxígeno, vitaminas, minerales y aminoácidos que están presentes en el mosto; con esto la levadura producirá las enzimas necesarias para su reproducción; además, es primordial que cuente con oxígeno para la permeabilidad de la membrana de la levadura. Esta etapa debe estar en una temperatura inicial de 22 a 24 °C (Levabeer, 2019).
- **Segunda etapa:** La segunda etapa dura desde el primer día hasta el cuarto. Aquí la levadura estará creciendo exponencialmente, lo que provocará espuma en la superficie, ya que la levadura está consumiendo los azúcares desde los más simples a los compuestos; estos azúcares son: glucosa, fructosa y sacarosa (Levabeer, 2019).
- **Tercera etapa:** Esta etapa es la de maduración, que va desde el cuarto día hasta el décimo. Como la levadura ya no crecerá, la actividad decaerá y provocará agotamiento de los nutrientes y acumulación de metabolitos (Levabeer, 2019).
- **Cuarta etapa:** Esta etapa es conocida como *sedimentación*. Una vez que notemos que no hay presencia de burbujas, el proceso de fermentación ha terminado. En esta fase la levadura ha producido prácticamente todos los sabores y aromas y, la mayor parte de los

¹⁰ Es un producto natural que se encuentra en productos alimenticios, las hojas de laurel y otros aceites vegetales, cerveza, café, mantequilla y vinagre.

ésteres, azufres y alcoholes. Además, la espuma empieza a desaparecer y la levadura empieza a **flocular**¹¹ hacia el fondo del fermentador. Para ayudar a la sedimentación tenemos que enfriar la cerveza a 5 °C durante 10 días (Levabeer, 2019).

El éxito de una buena cerveza está en el control de la temperatura durante la etapa de fermentación.

1.4.6. Proceso de carbonatación

La carbonatación, también conocida como *gasificación*, es el último procedimiento en la elaboración de la cerveza. Consiste en inyectar dióxido de carbono (CO₂) para producir la espuma de la cerveza y las burbujas ayudan a compensar el amargor en la boca. La carbonatación se puede llevar a cabo de dos formas (Bright, 2020):

- **Carbonatación natural:** En la carbonatación natural, se utiliza el mismo CO₂ que se produce en una segunda fermentación. Para ello, se agregan más azúcares fermentables, como azúcar de maíz, caña de azúcar y extracto de malta. También se puede utilizar la carbonatación natural en el fermentador isobárico y agregar una válvula de presión que libere CO₂ sólo si se supera la presión seleccionada. Si bien este proceso no requiere más inversión, será difícil conseguir un nivel correcto de carbonatación y el tiempo de espera es mayor de 2 semanas (Bright, 2020).
- **Carbonatación forzada:** En la carbonatación forzada se requiere un equipo especial que consta de un barril para envasar la cerveza, una botella de CO₂ con bomba y un manómetro para controlar la presión que se quiere inyectar en el barril de cerveza de 20 litros. Se muestra un ejemplo de la carbonatación en la **Ilustración 15**.

11

Ilustración 15

Material de carbonatación forzada (Pablo, 2020)



Dependiendo del estilo de cerveza que se quiera hacer, se necesita una tabla de temperatura y presión para controlar estos factores; un ejemplo de estas tablas se encuentra en la

Ilustración 16. Se puede observar en ella que, a menos temperatura, se necesita menos presión en la carbonatación de la cerveza. Una vez que se tiene en cuenta la temperatura a la que se quiere trabajar, se procede a inyectar el CO₂ al barril hasta conseguir la presión deseada. Las ventajas de este procedimiento consisten en que se pueden conseguir niveles de carbonatación perfectos, se tiene control de la presión, los barriles pueden mantener las cervezas en excelentes condiciones y el tiempo de espera es de 48 horas. Las desventajas radican en que se requiere más inversión, el manejo de los instrumentos es un poco tedioso y requiere mucha práctica para implementarlos de la mejor manera (Bright, 2020).

Ilustración 16

Volúmenes de CO₂ según la temperatura (Pablo, 2020)

		Temperatura °C															
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Carbonatación	1.5			0.08	0.16	0.25	0.34	0.43	0.53	0.62	0.72	0.82	0.92	1.03	1.13	1.24	1.35
	1.6		0.06	0.15	0.24	0.34	0.43	0.52	0.62	0.72	0.82	0.93	1.04	1.14	1.26	1.37	1.48
	1.7	0.04	0.13	0.22	0.32	0.42	0.51	0.61	0.72	0.82	0.92	1.04	1.15	1.26	1.38	1.49	1.61
	1.8	0.11	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.71	0.81	0.92	1.03	1.15	1.26	1.38	1.50	1.62	1.74
	1.9	0.17	0.27	0.37	0.48	0.58	0.69	0.80	0.91	1.02	1.14	1.26	1.38	1.50	1.62	1.75	1.87
	2.0	0.24	0.34	0.45	0.56	0.66	0.78	0.89	1.01	1.12	1.24	1.36	1.49	1.61	1.74	1.87	2.00
	2.1	0.31	0.41	0.52	0.63	0.75	0.86	0.98	1.10	1.22	1.35	1.47	1.60	1.73	1.86	2.00	2.13
	2.2	0.37	0.48	0.60	0.71	0.83	0.95	1.07	1.20	1.32	1.45	1.58	1.71	1.85	1.99	2.12	2.26
	2.3	0.44	0.55	0.67	0.79	0.91	1.04	1.16	1.29	1.42	1.56	1.69	1.83	1.97	2.11	2.25	2.39
	2.4	0.50	0.62	0.74	0.87	1.00	1.12	1.25	1.39	1.52	1.66	1.80	1.94	2.08	2.23	2.38	2.52
	2.5	0.57	0.69	0.82	0.95	1.08	1.21	1.35	1.48	1.62	1.76	1.91	2.05	2.20	2.35	2.50	2.65
	2.6	0.63	0.76	0.89	1.02	1.16	1.30	1.44	1.58	1.72	1.87	2.01	2.16	2.32	2.47	2.63	2.78
	2.7	0.70	0.83	0.97	1.10	1.24	1.38	1.53	1.67	1.82	1.97	2.12	2.28	2.43	2.59	2.75	2.91
	2.8	0.76	0.90	1.04	1.18	1.32	1.47	1.62	1.77	1.92	2.07	2.23	2.39	2.55	2.71	2.88	3.04
2.9	0.83	0.97	1.11	1.26	1.41	1.56	1.71	1.86	2.02	2.18	2.34	2.50	2.67	2.83	3.00	3.17	
3.0	0.89	1.04	1.19	1.34	1.49	1.64	1.80	1.96	2.12	2.28	2.45	2.61	2.78	2.95	3.13	3.30	

Presiones en bares

En este capítulo se revisaron los conceptos de los usos directos de la geotermia, así como la localización de esta fuente de energía en la república mexicana; se dio a conocer el procedimiento para elaborar cerveza artesanal; se presentaron las variables que se deben controlar para poder crear un diagrama de trabajo e instrumentación; por último, se establecieron criterios básicos para seleccionar los equipos necesarios y, así controlar el proceso.

2. Marco teórico

En este capítulo, se describen conceptos que nos permitirán hacer los documentos de ingeniería de diseño y de detalle para que se pueda hacer la elección correcta de los equipos y realizar el prototipo de la cervecería artesanal geotérmica. Para emplear estos documentos es necesario llevar a cabo un balance de masa y energía; conocer sobre los actuadores que se van a utilizar en nuestro prototipo de planta y conocer sobre los controladores.

Algunos de los conceptos presentados son los lazos de control y el controlador proporcional, integral y derivador (PID) - el cual es un controlador que ayudará en el proceso de la elaboración de la cerveza- así como una serie de instrumentos de control.

2.1. Sistemas analógicos y digitales

En pocas palabras, los sistemas analógicos son sistemas que manipulan cantidades físicas representadas en forma análoga en donde los valores varían en un intervalo continuo y, por lo tanto, no son tan precisas. Los sistemas digitales son una combinación de dispositivos diseñados para manipular cantidades físicas o información que estén presentados en forma digital, suelen ser más precisos y solamente representan valores de ceros y unos (Daniel, 2018).

Para desarrollar el sistema de control de la propuesta o del prototipo de la cervecería operada con recursos geotérmicos en condiciones de laboratorio es necesario la manipulación de entradas y salidas digitales y analógicas.

Las entradas analógicas que ocupamos son de un controlador lógico programable (PLC). Estos ocupan dispositivos Convertidor Analógico Digital (ADC) para poder parametrizar las señales y procesar de manera digital. Estas señales analógicas representan variables como temperatura, presión y el PLC las convierte en valores digitales para su procesamiento.

Por otro lado, las salidas analógicas en un PLC ocupan un Convertidor Digital Analógico (DAC) para el envío de señales hacia actuadores o dispositivos de control que requieren ajustes continuos y graduales. Un ejemplo común es utilizar estas salidas para controlar la velocidad de un motor o la posición de una válvula.

Las entradas digitales son canales de entrada en el PLC que reciben señales discretas o binarias, es decir, que solo pueden tener dos estados: ON/OFF, 1 o 0. Estas entradas son utilizadas para

detectar eventos o estados específicos, como el accionamiento de un interruptor o el estado de un sensor de proximidad.

Finalmente, las salidas digitales son canales de salida que permiten al PLC enviar señales discretas o binarias para activar o desactivar dispositivos o elementos de control. Un ejemplo común de su uso es enviar una señal digital para encender o apagar una bomba o un LED.

2.2. Sistema de control de lazo cerrado

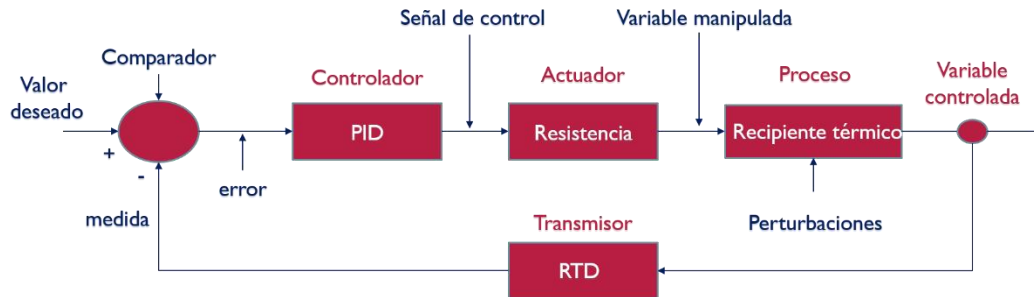
En los sistemas de control de lazo cerrado, la salida o señal controlada debe ser realimentada y comparada con la entrada de referencia, y se debe enviar una señal actuante o acción de control, proporcional a la diferencia entre la entrada y la salida a través del sistema, para disminuir el error y corregir la salida (Mario Alberto Perez, 2007). Estos son los elementos de nuestro sistema de control de lazo cerrado:

- **Medición de variable:** Se realiza la medición de la variable que se desea controlar mediante el uso de sensores o transductores. Esta variable puede abarcar diferentes magnitudes, como temperatura, presión, velocidad, nivel, entre otras.
- **Comparador:** La señal de medición se compara con el valor deseado (setpoint) para obtener el error, que es la diferencia entre la medición y la referencia.
- **Controlador:** El error obtenido en la etapa anterior se envía al controlador, que es el componente responsable de calcular la señal de control necesaria para corregir la desviación. El controlador puede ser de tipo proporcional, integral, derivativo (PID) o de otros tipos más complejos, dependiendo de la aplicación.
- **Actuador:** La señal de control calculada por el controlador se envía al actuador, que es el componente que realiza la acción correctiva sobre el proceso o planta, por ejemplo, las válvulas.
- **Ajuste del proceso:** El actuador se ejecuta sobre el proceso, modificando la variable controlada. Como resultado, la variable medida cambia y se reduce el error en comparación con el setpoint.
- **Retroalimentación:** La variable medida después de la acción del actuador se vuelve a comparar con el setpoint, y el ciclo se repite continuamente en un bucle cerrado (Roca Cusido, 2014).

Para entender el sistema de control de lazo cerrado, se presenta un diagrama en la **Ilustración 17**.

Ilustración 17

Diagrama de componentes de un sistema de control de lazo cerrado



2.2.1. Control proporcional

Un lazo de control proporcional (P) constituye un sistema de control en el que la salida del controlador es directamente proporcional al error, que resulta de la diferencia entre la consigna (setpoint) y la medición actual del proceso (Villajulca, 2018). En otras palabras, cuanto mayor sea el error, mayor será la señal de control emitida por el controlador.

Este se representa con la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t)$$

Donde:

$u(t) \rightarrow$ Salida del sistema

$e(t) \rightarrow$ Entrada del sistema con respecto al tiempo

$K_p \rightarrow$ Constante proporcional

Un ejemplo de lazo de control P sería un termostato que controla la temperatura de una habitación. Si la temperatura actual es más baja que la temperatura deseada (setpoint), el termostato, cuyo ejemplo está en la **Ilustración 18**, activa la calefacción para aumentar la temperatura. Cuanto mayor sea la diferencia entre la temperatura actual y la deseada, mayor será la potencia de calefacción suministrada (Villajulca, 2018).

Ilustración 18

Termostato (DOMINION, 2022)



2.2.2. Control proporcional derivativo

Un lazo de control proporcional derivativo (PD) es un sistema de control que, además de tener en cuenta el error, también considera la tasa de cambio del error. La señal de control emitida por el controlador es proporcional al error y a su tasa de cambio. Esto permite que el sistema de control reaccione más rápidamente a los cambios en el proceso y reduzca la oscilación alrededor del setpoint (Villajulca, 2018).

Este se representa con la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt$$

Donde:

$u(t) \rightarrow$ Salida del sistema

$e(t) \rightarrow$ Entrada del sistema con respecto al tiempo

$K_p \rightarrow$ Constante proporcional

$K_i \rightarrow$ Constante integral

Un ejemplo de lazo de control PD sería el control de la velocidad de un motor eléctrico, que se aprecia en la **Ilustración 19**. Si la velocidad del motor es inferior a la velocidad deseada, el

controlador aumenta la señal de control en proporción a la diferencia de velocidad y su tasa de cambio. Esto permite que el motor acelere más rápidamente y se estabilice en la velocidad deseada.

Ilustración 19

Motor eléctrico (Transelec, 2021)



2.2.3. Control proporcional integral derivativo

Un lazo de control proporcional integral derivativo (PID) es un sistema de control que además de considerar el error y su tasa de cambio, también tiene en cuenta la integral del error en el tiempo. La señal de control emitida por el controlador es proporcional al error, a su tasa de cambio y a su integral (Villajulca, 2018).

Este se representa con la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Donde:

$u(t) \rightarrow$ Salida del sistema

$e(t) \rightarrow$ Entrada del sistema con respecto al tiempo

$K_p \rightarrow$ Constante proporcional

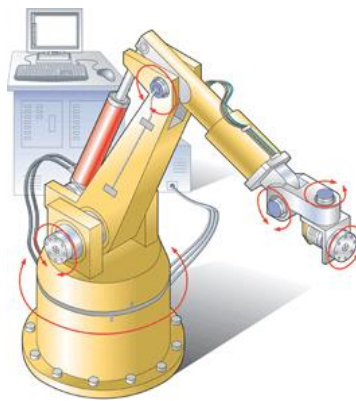
$K_i \rightarrow$ Constante integral

$K_d \rightarrow$ Constante derivativa

Esto permite que el sistema de control pueda eliminar el error en estado estacionario, es decir, que la salida del proceso se establezca en el setpoint sin oscilaciones. Un ejemplo de lazo de control PID -visible en la **Ilustración 20**- sería el control de la posición de un robot manipulador. Si el robot está desviado de su posición deseada, el controlador aumenta la señal de control en proporción a la diferencia de posición, su tasa de cambio y su integral en el tiempo. Esto permite que el robot se desplace hacia la posición deseada de manera rápida y precisa.

Ilustración 20

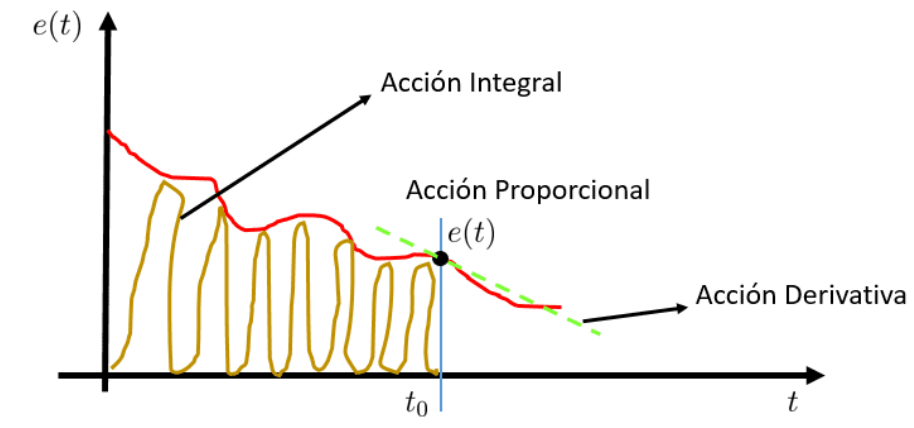
Robot manipulador (Sara, 2017)



En otras palabras, el controlador PID puede ser definido como una combinación de tres estados del tiempo: presente, pasado y futuro, un ejemplo de esta interpretación se encuentra en el gráfico de la **Ilustración 21**. El valor proporcional representa el presente y nos indica la meta a alcanzar, pero durante el proceso pueden ocurrir oscilaciones. Para abordar esto, se utiliza el valor integral que se asocia al pasado y se encarga de calcular el área bajo la curva de las oscilaciones que ocurrieron. Por último, el valor derivativo representa el futuro y, con base en los valores del integrador y el proporcional, minimiza el error para que el sistema alcance su setpoint lo más rápido posible y evite errores (García, 2019).

Ilustración 21

Gráfica del proceso del controlador PID (García, 2019)

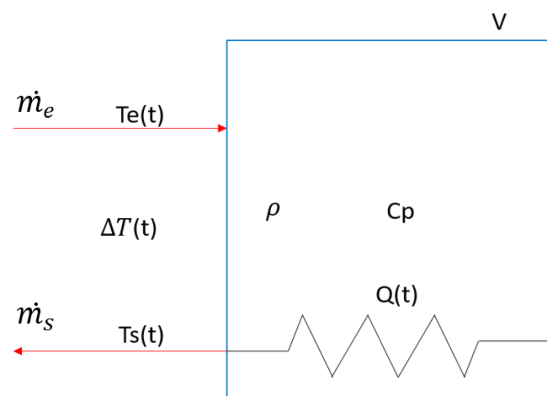


2.3. Cálculo de parámetros K_p , K_i y K_d

Para determinar los parámetros de K_p , K_i y K_d , requeridos en la ecuación del controlador PID, se debe iniciar con la obtención de la función de transferencia. Este proceso implica el modelado del sistema físico del recipiente térmico, que está destinado al control de la temperatura. Todos estos elementos se detallan en la **Ilustración 22**.

Ilustración 22

Modelo de un sistema térmico



Los parámetros son:

ρ → Densidad del agua
 C_p → Calor específico del agua
 \dot{m}_s → Caudal de salida
 T_s → Temperatura de salida

V → Volumen del recipiente
 \dot{m}_e → Caudal de entrada
 T_e → Temperatura de entrada
 Q → Calor entregado por la resistencia

La relación de estos parámetros en una función es la siguiente:

$$\rho V C_p \frac{dT}{dt} = -\rho C_p \dot{m} [T_s(t) - T_e(t)] + Q(t) \dots (1)$$

Nuestro caudal de salida y entrada es el mismo, por lo tanto, lo definimos como \dot{m} :

$$\dot{m} = \dot{m}_e = \dot{m}_s$$

También, definimos k_1 , k_2 y ΔT con los siguientes parámetros:

$$k_1 = \rho V C_p$$

$$k_2 = \rho C_p \dot{m}$$

$$\Delta T = T_s(t) - T_e(t)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{d\Delta T}{dt}$$

Sustituimos en la ecuación (1) a k_1, k_2 y ΔT :

$$k_1 \frac{d\Delta T(t)}{dt} = -k_2 \Delta T(t) + Q(t) \dots (2)$$

Aplicamos transformada de Laplace a la ecuación (2):

$$L \left\{ k_1 \frac{d\Delta T(t)}{dt} \right\} = L \{ -k_2 \Delta T(t) \} + L \{ Q(t) \}$$

$$k_1 s \Delta T(s) = -k_2 \Delta T(s) + Q(s)$$

$$\Delta T(s) = \left[\frac{1}{k_1 s + k_2} \right] Q(s)$$

Despejamos y obtenemos nuestra función de transferencia:

$$\frac{\Delta T(s)}{Q(s)} = \frac{1}{k_1 s + k_2} \dots (3)$$

Sustituimos nuestras constantes en los parámetros k_1 y k_2 :

$$\rho = 968.62 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$V = 0.076 [m^3]$$

$$C_p = 4.18 \left[\frac{kJ}{kg^\circ C} \right]$$

$$\dot{m} = 0.00034 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$k_1 = \left(968.62 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right) (0.076 [m^3]) \left(4.18 \left[\frac{kJ}{kg^\circ C} \right] \right) \quad k_2 = \left(968.62 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right) \left(4.18 \left[\frac{kJ}{kg^\circ C} \right] \right) \left(0.00034 \left[\frac{m^3}{s} \right] \right)$$

$$k_1 = 307.7$$

$$k_2 = 1.377$$

$$\frac{\Delta T(s)}{Q(s)} = \frac{1}{307.7 s + 1.377}$$

Utilizando el software Matlab con licencia oficial de la UNAM, la función de transferencia se incorpora en la herramienta “PID tuner” con el propósito de calcular las constantes K_p , K_i y K_d . La programación de las ecuaciones empleadas se exhibe en la **Ilustración 23**. Posteriormente, en la **Ilustración 24** se puede observar la respuesta del controlador PID aplicado a la función de transferencia. Finalmente, en la **Ilustración 25**, se presentan los resultados obtenidos para las constantes mencionadas.

Ilustración 23

Programación de Matlab

```
clear clc;

rho= 968.62;
q= 0.00034;
v= 0.076;
cp= 4.18;

k1= rho*v*cp;
k2=rho*cp*q;

n=[1];
d=[k1,k2];
G=tf(n,d)
```

Ilustración 24

Gráfica de comportamiento de nuestro controlador PID

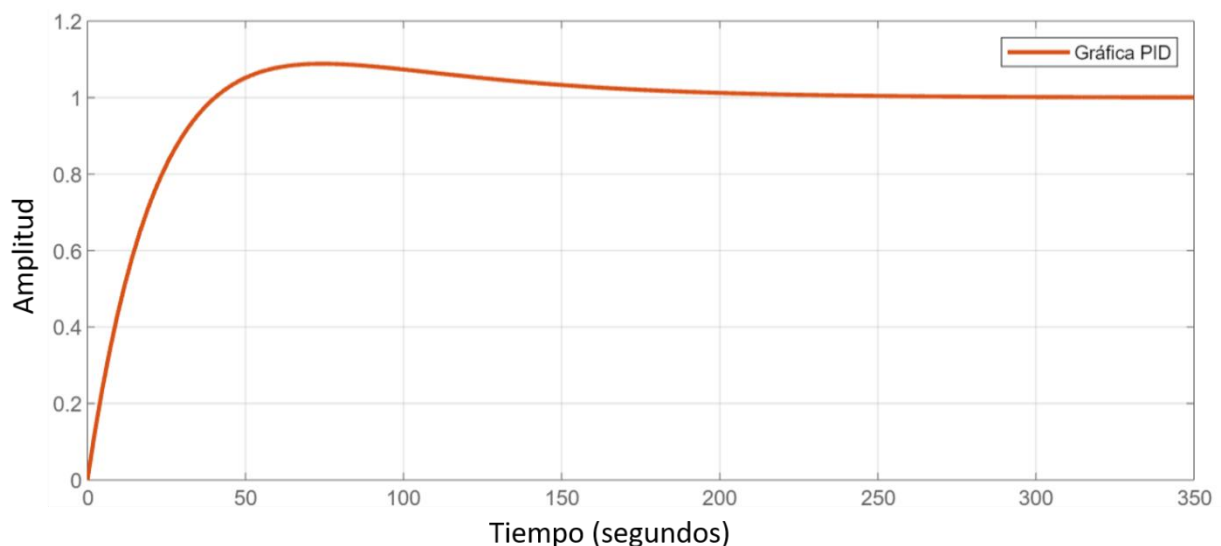


Ilustración 25

Valor de los parámetros K_p , K_i y K_d

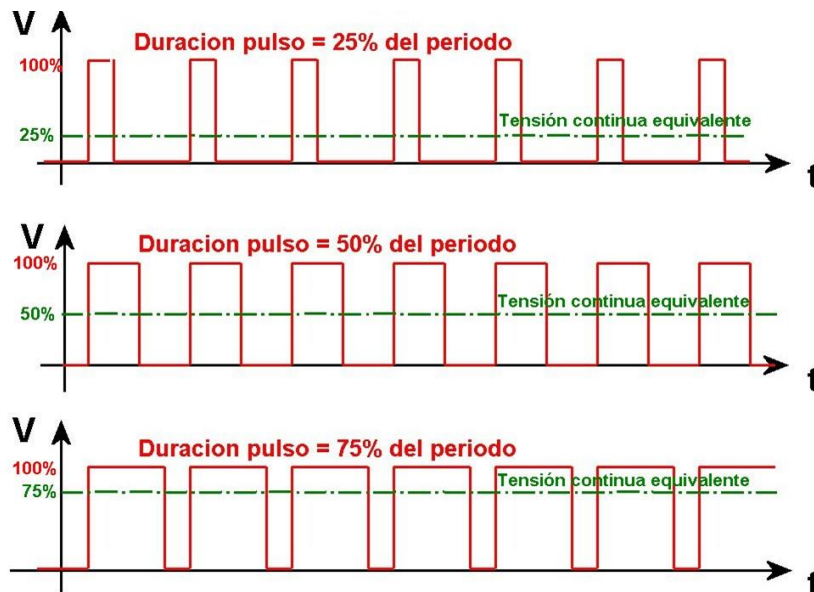
	Tuned
K_p	17.2408
T_i	66.5726
T_d	0.0017324

2.4. Modulación por ancho de pulsos

La modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM por sus siglas en inglés) es una técnica utilizada en electrónica para controlar la cantidad de energía que se envía a un dispositivo; la **Ilustración 26** ejemplifica su comportamiento. Esta técnica consiste en variar el ancho de los pulsos de una señal eléctrica constante, manteniendo la amplitud y la frecuencia de la señal constantes (Kohlhase, 2020).

Ilustración 26

Porcentajes de salida de pulsos (HETPRO, 2015)



La duración del pulso se modula de manera proporcional a la señal de entrada que se quiere transmitir. Esta técnica es muy utilizada en el control de motores DC, iluminación LED, en la carga de baterías, entre otras aplicaciones. La modulación por ancho de pulsos permite controlar

la cantidad de energía que se envía a un dispositivo, lo que puede resultar en un mayor rendimiento energético y en una mayor precisión en el control de dispositivos eléctricos (HETPRO, 2015).

2.5. Controlador Lógico Programable

Un Controlador Lógico Programable (PLC, por sus siglas en inglés) es un dispositivo utilizado en la automatización industrial para controlar y monitorear procesos. Es una computadora diseñada específicamente para controlar procesos y máquinas, y se utiliza en una variedad de industrias, incluyendo la fabricación, la energía y la industria alimentaria. Los PLC se programan utilizando lenguajes de programación especializados y se utilizan para controlar una amplia gama de procesos industriales, desde la simple apertura y cierre de válvulas hasta el control de sistemas complejos de producción (Industrias, 2021).

Los PLC presentan una serie de ventajas y desventajas. Entre las ventajas se consideran las siguientes:

- **Fiabilidad:** Los PLC son creados específicamente para el control y la automatización industrial, lo que significa que se producen para ser altamente confiables y duraderos. Los PLC son capaces de funcionar de manera confiable en ambientes industriales adversos, con altas temperaturas, vibraciones, humedad y polvo.
- **Flexibilidad:** Los PLC son altamente flexibles y programables para adaptarse a una amplia gama de procesos industriales y sistemas de control. Se programan para realizar una variedad de tareas y se pueden actualizar o reprogramar fácilmente en caso de cambios en el proceso o en los requerimientos del sistema.
- **Fácil mantenimiento:** Los PLC no requieren mucho mantenimiento y se diagnostican fácilmente en caso de fallas. La mayoría de los PLC vienen con herramientas de diagnóstico incorporadas que permiten al técnico de mantenimiento encontrar rápidamente la fuente del problema.
- **Seguridad:** Los PLC permiten una mayor seguridad en los procesos industriales, ya que se pueden programar para cumplir con los más altos estándares de seguridad industrial. Además, los PLC pueden ser programados para detectar situaciones peligrosas y tomar medidas para garantizar la seguridad de los trabajadores y de los equipos.

Algunas desventajas de los PLC son las que se enumeran a continuación:

- **Costo:** Los PLC pueden resultar costosos, especialmente para aplicaciones de menor escala. En otras palabras, es posible que el costo de los PLC resulte oneroso, por lo que su compra puede resultar poco viable, especialmente para medianas y pequeñas empresas.
- **Complejidad:** Los PLC son dispositivos que requieren un nivel de conocimiento técnico y habilidades de programación para su uso efectivo. El personal de la empresa debe estar capacitado para programar y mantener los sistemas de control basados en PLC.
- **Vulnerabilidad a los ataques cibernéticos:** Los PLC pueden ser vulnerables a los ataques cibernéticos y a los virus informáticos. Las empresas deben tomar medidas de seguridad adecuadas para proteger los sistemas de control basados en PLC.

Hay muchas marcas de PLC en el mercado y cada una ofrece diferentes características y capacidades. Algunas marcas populares son: Siemens, Allen-Bradley, Mitsubishi Electric, Omron y Schneider Electric. Estas marcas ofrecen PLC con diferentes características, tales como cantidad de entradas y salidas, velocidad de procesamiento, capacidad de memoria, protocolos de comunicación y tipos de redes de campo compatibles (Boltronic, 2021).

Siemens (uno de sus equipos se muestra en la **Ilustración 27**), por ejemplo, es una marca de PLC muy popular que ofrece una amplia gama de productos, desde PLC para pequeñas máquinas hasta PLC para sistemas de control complejos. Allen-Bradley es otra marca popular de PLC que ofrece una amplia gama de productos para la automatización industrial. Mitsubishi Electric es otra marca que ofrece PLC con alta velocidad de procesamiento y un alto número de entradas y salidas. Omron, una marca más se enfoca en ofrecer PLC compactos y eficientes energéticamente, mientras que Schneider Electric es conocida por su enfoque en la integración de sistemas y la seguridad de los procesos industriales (Boltronic, 2021).

Ilustración 27 PLC Siemens S7-1200 (Boltronic, 2021)

PLC Siemens S7-1200 (Boltronic, 2021)



2.6. Interfaz Hombre-Máquina

Una Interfaz Hombre-Máquina (HMI, por sus siglas en inglés) es un sistema que permite la interacción entre una persona y una máquina, en particular un sistema automatizado o un proceso industrial. En otras palabras, la HMI es un dispositivo que permite a los operadores controlar y monitorear los procesos industriales, así como recibir información de las máquinas y sistemas automatizados (Autycom, 2020).

Los usos de las HMI en la industria son diversos y abarcan desde la supervisión y el control de procesos de fabricación hasta la monitorización y control de sistemas de distribución de energía y redes de suministro. Las HMI se utilizan en la automatización de procesos de fabricación, en la industria alimentaria, farmacéutica y petroquímica, entre otras (Autycom, 2020).

Entre las ventajas de las HMI se consideran las siguientes:

- Permiten a los operadores monitorear y controlar los procesos industriales de manera eficiente y precisa.
- Proporcionan información en tiempo real y alertan sobre posibles fallos o problemas en los procesos.
- Permiten el acceso a datos históricos y estadísticas de los procesos, lo que facilita la identificación de patrones y el análisis de datos.
- Son fáciles de usar y pueden ser personalizadas según las necesidades del usuario.

Sin embargo, también hay algunas desventajas en el uso de las HMI, como:

- La complejidad y la necesidad de capacitación de los operadores para el uso efectivo de las HMI.
- El costo y la complejidad de la instalación y configuración de los sistemas de las HMI.
- La vulnerabilidad a los ataques cibernéticos y la necesidad de implementar medidas de seguridad para proteger los sistemas.

Las HMI, -como se aprecian en la **Ilustración 28**- incluyen pantallas táctiles, gráficos en tiempo real, alarmas y alertas configurables, compatibilidad con una variedad de sistemas y protocolos de comunicación, y una interfaz fácil de usar. También pueden incluir características avanzadas como la integración con sistemas de gestión empresarial y herramientas de análisis de datos (Autycom, 2020).

Ilustración 28

Tipos de las HMI (omron, 2023)



2.7. Instrumentos de control

Un instrumento de control es un dispositivo que se utiliza para medir, visualizar y controlar variables en un proceso o sistema. Estos dispositivos se utilizan en una amplia gama de aplicaciones industriales y comerciales, como en la automatización de fábricas, la regulación de sistemas de calefacción y aire acondicionado, el monitoreo de procesos químicos, el control de la temperatura y la presión en procesos de producción, entre otros (sindustrial, 2018).

Los instrumentos de control se utilizan para medir variables como la temperatura, la presión, el flujo, el nivel, la humedad, la velocidad y la posición. Estos dispositivos pueden incluir sensores,

transmisores, controladores, registradores, indicadores, válvulas y actuadores, entre otros componentes.

La función principal de un instrumento de control es proporcionar información precisa y en tiempo real sobre el proceso o sistema que se está monitoreando, permitiendo al usuario tomar decisiones informadas sobre el control del proceso y la optimización de los resultados (sdindustrial, 2018).

2.7.1. Transductor

Los transductores son dispositivos que convierten una forma de energía o magnitud física en otra, permitiendo medir o detectar diferentes variables del entorno y convertirlas en señales eléctricas o electrónicas que puedan ser procesadas por sistemas de control. Existen varios tipos de transductores, algunos de los cuales son:

- **Transductores de Presión:** Convierten la presión mecánica o fuerza aplicada sobre una superficie en una señal eléctrica proporcional (4-20 mA o 0-10 V).
- **Transductores de Temperatura:** Detectan cambios de temperatura y los convierten en señales eléctricas (4-20 mA o 0-10 V), un ejemplo de ellos está en la **Ilustración 29**.
- **Transductores de Flujo:** Convierten la velocidad o caudal de un fluido en una señal eléctrica (0-5 V).

Las aplicaciones de los transductores son variadas y pueden encontrarse en campos como la medicina, la ingeniería, la industria automotriz, la industria aeronáutica, entre otros (Ehu, 2023).

Las ventajas de los transductores son su precisión y capacidad para proporcionar datos en tiempo real. Además, pueden ser pequeños y ligeros, lo que permite su uso en espacios reducidos y en aplicaciones móviles. Por otro lado, se consideran como desventajas de los transductores la necesidad de calibración periódica y la susceptibilidad a interferencias externas.

Ilustración 29

Transductor de pt100 a corriente de 4 a 20 mA

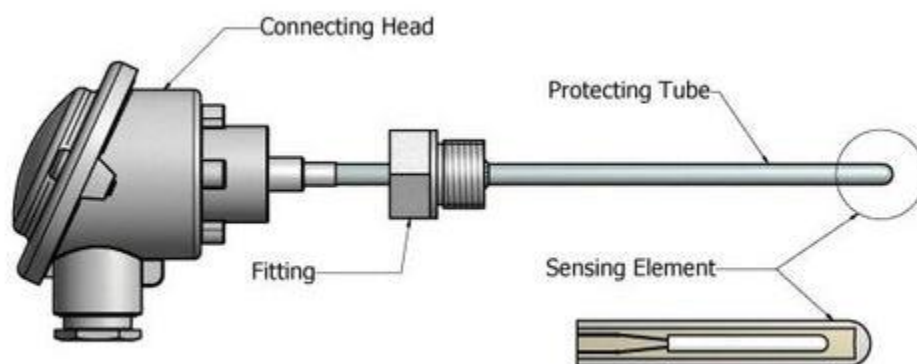


2.7.2. Detector de temperatura resistivo

Un detector de temperatura resistivo (RTD por sus siglas en inglés) es un tipo de sensor que se utiliza para medir la temperatura, la **Ilustración 30** ejemplifica un RTD. Éste consiste en un elemento de detección de temperatura compuesto por un alambre de platino, que cambia su resistencia eléctrica en función de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, la resistencia del alambre de platino también aumenta, lo que permite medir con precisión la temperatura del medio (logicbus, 2023).

Ilustración 30

Esquema de un RTD (GSL INDUSTRIAS, 2022)



Las aplicaciones más comunes de los RTD incluyen:

- **Monitorización y control de procesos industriales:** Los RTD se utilizan ampliamente en procesos industriales para medir la temperatura de líquidos, gases y sólidos.

- **Aplicaciones médicas:** Los RTD se emplean en equipos médicos para medir la temperatura corporal, como termómetros electrónicos y monitores de temperatura.
- **Investigación y desarrollo:** Los RTD se utilizan en laboratorios de investigación para medir la temperatura de sustancias químicas y materiales.

Los RTD implican las siguientes ventajas:

- **Alta precisión:** Los RTD son capaces de proporcionar mediciones de temperatura altamente precisas y confiables.
- **Estabilidad a largo plazo:** Los RTD son estables por mucho tiempo y ofrecen una buena repetibilidad.
- **Amplio rango de temperatura:** Los RTD pueden medir una extensa gama de temperaturas, desde temperaturas muy bajas hasta temperaturas muy altas.

Se consideran desventajas de los RTD:

- **El costo:** Los RTD son más caros que otros tipos de sensores de temperatura.
- **La sensibilidad a la vibración:** Los RTD pueden ser sensibles a la vibración y pueden requerir protección adicional en aplicaciones en las que hay vibración o choques.
- **La necesidad de una fuente de alimentación:** Los RTD requieren una fuente de alimentación externa para su funcionamiento.

El índice de protección (IP) del instrumento que utiliza un RTD dependerá del instrumento en sí mismo y del ambiente en el que se utiliza. La protección IP indica el nivel de protección que un instrumento tiene contra el ingreso de partículas sólidas y líquidas en su interior. Los RTD pueden ser utilizados en instrumentos con diferentes niveles de protección, desde IP20 hasta IP68, dependiendo de la aplicación y el entorno en el que se utilizan (GSL INDUSTRIAS, 2022).

2.7.3. Flujómetro

Un flujómetro **-Ilustración 31-** es un instrumento utilizado para medir la tasa de flujo de un fluido, ya sea líquido o gas, en un sistema de tuberías. Hay diferentes tipos de flujómetros disponibles en el mercado, incluyendo los de medición de caudal de volumen, los de medición de caudal de masa y los de medición de caudal de velocidad (Zarza, 2021).

Ilustración 31

Flujómetro (Zarza, 2021)



Se consideran como las aplicaciones más comunes de los flujómetros:

- El monitoreo de la tasa de flujo de líquidos y gases en procesos industriales, como la fabricación de alimentos y bebidas, la producción de petróleo y gas, y la producción de productos químicos.
- El control de procesos en plantas de tratamiento de agua y aguas residuales.
- El monitoreo y control de la tasa de flujo en sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado.
- El monitoreo de la tasa de flujo en sistemas de riego.

Las ventajas de los flujómetros son las siguientes:

- **Medición precisa:** Los flujómetros pueden proporcionar mediciones precisas y confiables de la tasa de flujo de líquidos y gases.
- **Amplio rango de tasa de flujo:** Los flujómetros miden una extensa gama de tasas de flujo, desde bajas hasta altas.
- **Fácil instalación y mantenimiento:** La mayoría de los flujómetros son fáciles de instalar y permiten fácilmente su mantenimiento.

Se consideran desventajas de los flujómetros:

- **El costo:** Los flujómetros pueden implicar un elevado costo, especialmente los que se utilizan en aplicaciones de alta precisión.

- **Las limitaciones en la viscosidad del fluido:** Es posible que algunos tipos de flujómetros presenten limitaciones en la medición de la tasa de flujo de líquidos con alta viscosidad.
- **La sensibilidad a la obstrucción:** Los flujómetros pueden ser sensibles a la obstrucción, lo que posiblemente afecte la precisión de la medición.

Con base en la Norma Internacional IEC 60529, consideraremos que estos sensores de flujo sean de código IP55 como se aprecia en las **Tablas de protección de equipos** (Galicia, 2018).

2.7.4. Válvulas digitales y de control

Una válvula digital y de control -**Ilustración 32**- es un dispositivo electrónico que se utiliza para controlar y regular el flujo de líquidos o gases en un sistema. Las válvulas digitales y de control pueden funcionar de forma manual o automática, y se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo el control de procesos industriales, sistemas de riego, equipos médicos, sistemas de calefacción, etc. (Suhissa, 2018).

Ilustración 32

Válvula de control



Algunas ventajas de las válvulas digitales y de control son:

- La precisión y fiabilidad en la regulación del flujo de líquidos o gases.
- Mayor facilidad de programación y control que las válvulas analógicas.

Se consideran desventajas de las válvulas digitales y de control:

- Su costo, que puede ser significativamente mayor que el de las válvulas analógicas.

- Su vulnerabilidad a fallos técnicos debido a su complejidad electrónica.

En cuanto al grado de protección IP, éste se refiere a la capacidad de la válvula digital y de control para resistir la entrada de agua y partículas sólidas. Una válvula tiene un grado de protección IP65 que estaría protegida contra el polvo y la inmersión temporal en agua, lo que puede observarse en las **Tablas de protección de equipos**.

2.7.5. Sensor de nivel

Un sensor de nivel es un dispositivo que se utiliza para medir la cantidad de un líquido o sólido en un tanque o contenedor. Hay diferentes tipos de sensores de nivel, y cada uno se utiliza en función del tipo de material que se va a medir y las condiciones del entorno (eicos, 2014). Algunos de los tipos más comunes de sensores de nivel incluyen:

- **Sensores de nivel de flotador:** Estos equipos tienen un flotador que se mueve hacia arriba y hacia abajo en función del nivel del líquido. El movimiento del flotador se convierte en una señal eléctrica que indica el nivel del líquido.
- **Sensores de nivel de presión:** Estos sensores miden el nivel del líquido mediante la medición de la presión hidrostática. Cuanto mayor sea la presión, mayor será el nivel del líquido.
- **Sensores de nivel capacitivos:** Miden el nivel del líquido mediante la medición de la capacitancia del líquido. La capacitancia cambia a medida que el nivel del líquido cambia, lo que permite medir el nivel.
- **Sensores de nivel ultrasónicos:** Estos sensores emiten ondas sonoras para medir la distancia desde el sensor hasta la superficie del líquido. El tiempo que tarda la onda en regresar se utiliza para calcular el nivel del líquido.
- **Sensores de nivel ópticos:** Ellos utilizan la refracción de la luz para medir el nivel del líquido. La luz se envía a través del líquido y se mide la cantidad de luz que se refracta. Un ejemplo de estos equipos se muestra en la **Ilustración 33**.

Ilustración 33

Sensor de nivel óptico (Newark, 2021)



Las aplicaciones de los sensores de nivel son diversas, y pueden incluir la medición del nivel de líquidos en tanques de almacenamiento, la medición del nivel de líquidos en reactores químicos, la medición del nivel de agua en ríos y lagos, entre otros (rechner-sensors, 2019).

Entre las ventajas de los sensores de nivel se encuentran:

- Capacidad para medir con precisión el nivel de líquidos y sólidos.
- Capacidad para proporcionar una lectura en tiempo real.
- Bajo costo y su facilidad de instalación.

Entre las desventajas de los sensores de nivel se encuentran:

- Susceptibilidad a la interferencia electromagnética.
- Necesidad de mantenimiento regular.
- Limitada precisión en algunos casos.

2.7.6. Relé de estado sólido

Un relé de estado sólido (SSR, por sus siglas en inglés) es un dispositivo electrónico que se utiliza para controlar la conmutación de señales eléctricas en circuitos, lo que se ve en la **Ilustración 34**. A diferencia de los relés electromecánicos tradicionales, los SSR no tienen partes móviles, como bobinas y contactos, y en su lugar utilizan componentes electrónicos semiconductores para la conmutación (Teii, 2023).

Ilustración 34

SSR de CD (Automationdirect, 2023)



Existen diferentes tipos de SSR, pero los más comunes son:

- **SSR de un solo polo, un solo tiro (SPST):** Este tipo de SSR presenta un solo canal de conmutación y se utiliza para encender o apagar una carga en un circuito.
- **SSR de doble polo, un solo tiro (DPST):** Este tipo de SSR posee dos canales de conmutación y se utiliza para encender o apagar dos cargas en un circuito al mismo tiempo.
- **SSR de un solo polo, doble tiro (SPDT):** Este tipo de SSR cuenta con un solo canal de conmutación que puede conectar una carga a una de dos fuentes de alimentación (Teii, 2023).

Las aplicaciones de los SSR son muy diversas, pero algunas de las más comunes incluyen:

- **Control de motores eléctricos:** Los SSR se utilizan a menudo en el control de motores eléctricos de alta potencia para evitar el desgaste de los contactos y mejorar la fiabilidad.
- **Control de la temperatura:** Los SSR se ocupan en sistemas de control de la temperatura para encender o apagar calentadores o refrigeradores.
- **Control de la iluminación:** Los SSR se emplean para encender o apagar luces y mejorar la eficiencia energética de los sistemas de iluminación (Matthew, 2022).

Los SSR presentan algunas ventajas:

- Son más rápidos y precisos que los relés electromecánicos.

- Cuentan con una vida útil más larga ya que no tienen partes móviles que se desgasten.
- Resultan más silenciosos que los relés electromecánicos.

Sin embargo, también tienen algunas desventajas:

- Tienen una menor capacidad de conmutación que los relés electromecánicos.
- Poseen una mayor resistencia interna que los relés electromecánicos, lo que puede generar más calor y afectar la eficiencia energética.
- Implican más costos que los relés electromecánicos.

Los elementos mostrados en el segundo capítulo permiten al lector identificar los elementos que ocuparemos para realizar la instrumentación y el control de la cervecería geotérmica. Con base en las investigaciones y los conocimientos adquiridos sobre los instrumentos de control y los lazos de control, se puede llevar a cabo la filosofía de operación, que se presentarán en el capítulo tres. Además, se puede determinar el diagrama de tuberías e instrumentación y seleccionar los equipos necesarios para el sistema.

3. Proceso de control e instrumentación de cervecera artesanal geotérmica

El prototipo de cervecería geotérmica que se plantea debe ser capaz de producir mínimo 20 litros, por lo cual es necesario elaborar la ingeniería de detalle.

En este capítulo se aborda la elaboración de documentos de ingeniería tanto para el diseño como para la implementación de la instrumentación y el control en una cervecera artesanal geotérmica. Se propone realizar un diagrama de tuberías e instrumentación basado en un DFP, el cual considera puntos clave del proceso que serán fundamentales para el control de la cervecería geotérmica.

Una vez obtenido el Diagrama de tuberías e instrumentación (DTI), se procederá a generar una lista de instrumentos, asignando los símbolos correspondientes según la norma ANSI/ISA-S5.1-1984. Posteriormente, se elaborará una hoja de datos detallada de los equipos, con el fin de facilitar la selección de modelos apropiados.

Con base en los modelos elegidos, se creará una lista de señales y controladores para determinar el tipo de control que se implementará en el sistema de monitoreo y control. Seguidamente, se realizará el diseño del tablero de control, teniendo en cuenta todos los componentes que se utilizarán en el sistema.

Una vez completado el diseño del tablero de control, se elaborará un diagrama eléctrico que indique las líneas de alimentación que se conectarán. Se realizarán los cálculos necesarios para seleccionar las protecciones adecuadas para el tablero. Con todas estas herramientas disponibles, se podrá comenzar a programar el PLC para el control de la cervecería geotérmica.

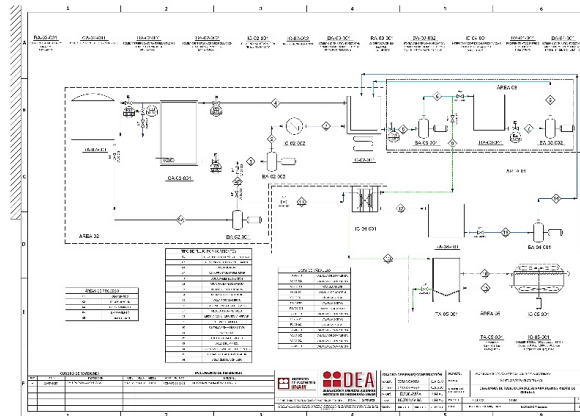
En resumen, este capítulo se enfoca en el desarrollo de documentos de ingeniería, desde el diseño del DTI y la selección de instrumentos, hasta la programación del PLC, con el objetivo de implementar un sistema de control eficiente en una cervecera artesanal geotérmica.

3.1. Diagrama de tuberías e instrumentación

Con base en un análisis de masa y energía, se realiza un diagrama de flujo y de proceso (DFP) para conocer el comportamiento del sistema. Este diagrama estará compuesto por las líneas de ensamble y los componentes del sistema, así como por la presión, temperatura, flujo, entalpía y potencia térmica. Se puede encontrar más información en la **Ilustración 35** y en el anexo **7.2**.

Ilustración 35

Diagrama de flujo y de proceso (Grupo IIDEA, 2023)



Una vez que se tienen los datos correspondientes y se cuenta con el DFP, se diseña el DTI bajo la norma ANSI/ISA-S5.1-1984. Este documento debe incluir ciertos elementos que se especifican a continuación:

- **Número de línea**

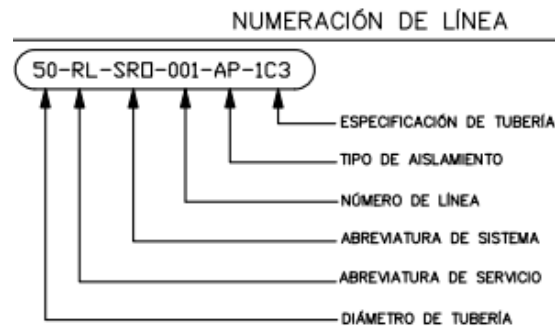
En esta sección del DTI se especifica el tipo de tubería utilizada, así como sus medidas y el servicio que se implementará. Éste debe ser escrito en un orden determinado, utilizando abreviaturas y separando cada elemento con un guion. El orden establecido es el siguiente:

- Diámetro de la tubería: 19mm, 21mm, etc.
- Abreviatura del servicio: Agua, cerveza, agua con glicol.
- Abreviatura del sistema: Geotérmico, recirculación, procesamiento, etc.
- Número de línea: línea 001, línea 002.
- Tipo de aislamiento: Con aislamiento térmico o sin aislamiento térmico.
- Especificación de tubería: Tubo plus, cobre, PVC, etc.

Podemos notar el ejemplo en la **Ilustración 36**.

Ilustración 36

Escritura en DTI de la línea de tuberías



- **Número de equipo**

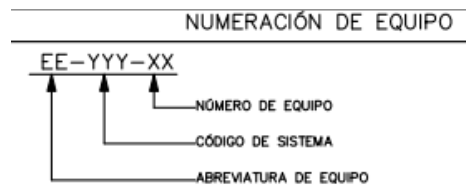
En esta sección se describe la forma en que se etiquetarán los equipos utilizados en el sistema, siguiendo el orden y las abreviaturas establecidas en la sección anterior. La secuencia para la etiqueta es la siguiente:

- Abreviatura de equipo: Siglas que representan al equipo; un ejemplo es la sigla CA para recipiente atmosférico.
- Código del sistema: Geotérmico, recirculación, procesamiento, etc.
- Número de equipo: Especifica cuántos equipos del mismo tipo se están ocupando en el sistema.

Se puede observar un ejemplo de esta etiqueta en la **Ilustración 37**.

Ilustración 37

Escritura en DTI de los equipos



- **Identificación de instrumento**

En esta sección se establece la forma en que se identificarán los instrumentos utilizados para monitorear y controlar el sistema, mostrando si son indicadores o transmisores y si se refieren a sensores de temperatura, presión, nivel o flujo. Al igual que en secciones

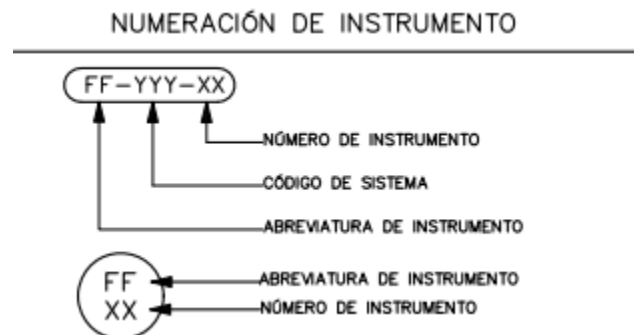
anteriores, estos instrumentos deben tener una etiqueta que permita generar una lista y un símbolo que los represente en el DTI. La etiqueta debe seguir el siguiente orden:

- Etiqueta
 - Abreviatura del instrumento: Un ejemplo es TT para transmisores de temperatura.
 - Código del sistema: El código que se necesita para identificar el sistema.
 - Número de instrumento: El número de equipos que se ocupan en el sistema.
- Símbolo
 - Abreviatura del instrumento: Un ejemplo es PT para transmisores de temperatura.
 - Número de instrumento: De preferencia se coloca el mismo número de la etiqueta.

Se puede observar en la **Ilustración 38** el ejemplo.

Ilustración 38

Escritura en DTI de instrumentación



- **Instrumentos y funciones**

En esta sección del DTI, se muestran los símbolos que identifican la función del instrumento implementado en el sistema, se observan los ejemplos en la **Ilustración 39**.

Ilustración 39

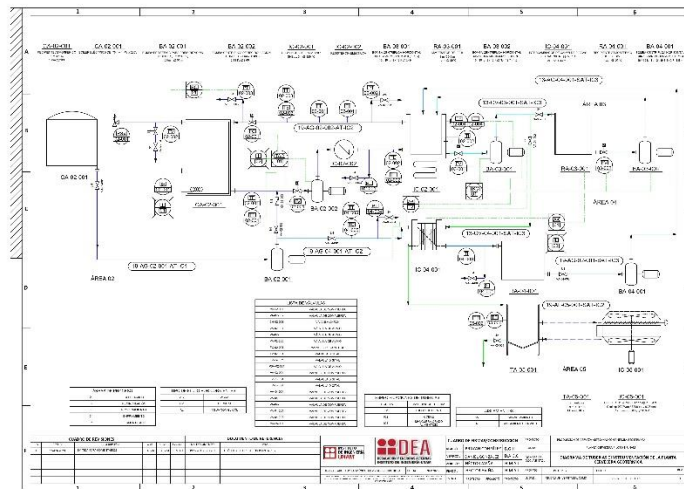
Simbología de instrumentos en DTI



Se presenta el DTI de la cerveza artesanal geotérmica, donde se colocaron instrumentos requeridos en nuestro proceso, además del diámetro de las tuberías y los servicios que se llevarán a cabo en el proceso. Ver **Ilustración 40** y el anexo 7.3.

Ilustración 40

Diagrama de tuberías e instrumentación



3.2. Selección de equipos

Los instrumentos, controladores y señales que se implementan en la PCG han sido seleccionados teniendo en cuenta los requisitos del balance de masa y energía que se incluyen en el DFP. Estos equipos deben cumplir con las unidades establecidas y están respaldados por una lista de instrumentos y hojas de datos correspondientes. Una vez que se han adquirido todos estos equipos, se procede a llevar a cabo la implementación de la automatización en la PCG.

3.2.1. Lista de instrumentos

La selección de los instrumentos para la implementación del sistema se realizó con base en el DTI. En esta lista se especifica el tipo de instrumento, su ubicación, el servicio que realiza, el código de línea correspondiente y el documento asignado que contiene sus especificaciones.

Tabla 1

Lista de instrumentos

Lista de instrumentos										
No.	Tag	Tipo de instrumento	Estado	Ubicación	Servicio	DTI	No. De Línea	I/O Tipo	Unidades	Hoja de Datos
1	FC0201	Válvula de control	Nuevo	Sistema	Recirculación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	DO	N/A	PCG-I-HD-00-0001-VALVULAS DE CONTROL
2	FT0201	Transmisor de flujo	Nuevo	Sistema	Recirculación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	DI	l/s	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE FLUJO
3	FV0201	Válvula solenoide	Nuevo	Sistema	Recirculación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	DO	N/A	PCG-I-HD-00-0001-VALVULAS SOLENOIDES
4	FV0202	Válvula solenoide	Nuevo	Sistema	Recirculación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	DO	N/A	PCG-I-HD-00-0001-VALVULAS SOLENOIDES
5	FV0203	Válvula solenoide	Nuevo	Sistema	Recirculación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	DO	N/A	PCG-I-HD-00-0001-VALVULAS SOLENOIDES
6	FV0204	Válvula solenoide	Nuevo	Sistema	Recirculación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	DO	N/A	PCG-I-HD-00-0001-VALVULAS SOLENOIDES
7	IS0201	Interruptor de corriente	Nuevo	Sistema	Recirculación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	DI	N/A	PCG-I-HD-00-0001-INTERRUPTOR DE CORRIENTE
8	PI0401	Indicador de presión	Nuevo	Sistema	Enfriamiento	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-04-001-SA-IC3	AI	bar	PCG-I-HD-00-0001-INDICADOR DE PRESION
9	PT0201	Transmisor de presión	Nuevo	Sistema	Recirculación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	AI	bar	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE PRESION
10	PT0202	Transmisor de presión	Nuevo	Sistema	Recirculación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	AI	bar	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE PRESION
11	PT0203	Transmisor de presión	Nuevo	Sistema	Recirculación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	AI	bar	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE PRESION
12	PT0404	Transmisor de presión	Nuevo	Sistema	Enfriamiento	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-04-001-SA-IC2	AI	bar	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE PRESION
13	TI0201	Indicador de temperatura	Nuevo	Sistema	Recirculación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	AI	°C	PCG-I-HD-00-0001-INDICADOR DE TEMPERATURA
14	TI0202	Indicador de temperatura	Nuevo	Sistema	Recirculación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	AI	°C	PCG-I-HD-00-0001-INDICADOR DE TEMPERATURA
15	TI0403	Indicador de temperatura	Nuevo	Sistema	Recirculación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-04-001-SA-IC3	AI	°C	PCG-I-HD-00-0001-INDICADOR DE TEMPERATURA
16	TT0201	Transmisor de temperatura	Nuevo	Sistema	Recirculación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	AI	°C	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE TEMPERATURA
17	TT0202	Transmisor de temperatura	Nuevo	Sistema	Recirculación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	AI	°C	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE TEMPERATURA
18	TT0203	Transmisor de temperatura	Nuevo	Sistema	Recirculación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	AI	°C	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE TEMPERATURA
19	TT0204	Transmisor de temperatura	Nuevo	Sistema	Recirculación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	AI	°C	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE TEMPERATURA
20	TT0405	Transmisor de temperatura	Nuevo	Sistema	Enfriamiento	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-04-001-SA-IC2	AI	°C	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE TEMPERATURA
21	TT0506	Transmisor de temperatura	Nuevo	Sistema	Fermentación	PCG-I-DTI-00-00-01_0	13-CV-05-001-SA-IC3	AI	°C	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE TEMPERATURA

3.2.2. Lista de dispositivos de control

Los controladores también desempeñan un papel fundamental en el DTI, ya que serán programados para llevar a cabo la automatización del sistema. En el DTI se mencionan las entradas y salidas de los controladores, así como el tipo de controlador que se implementará.

Tabla 2

Lista de dispositivos de control

Lista de controladores y alarmas					Parámetros		Documento	
No.	Símbolo DTI	Nombre del controlador	Entrada	Salida	Setpoint	unidad	DTI	No. De Línea
1	PC-01	Controlador de presión	PT-02-003	FV-02-002	5	BAR	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2
2	IL-01	Indicador led de corriente	IS-02-001	IL-01	1	BOOL	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2
3	IL-02	Indicador led de recirculación	TT-02-001	IL-02	1	BOOL	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2
4	IL-03	Indicador led de tiempo	AK-01	IL-03	1	BOOL	PCG-I-DTI-00-00-01_0	13-CV-03-001-SA-IC3
5	TAC-01	Alarma de controlador de temperatura	TT-02-001	FV-02-001,FC-02-001,BA-02-001	80	°C	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2
6	TKC-01	Controlador de temperatura y tiempo	TT-02-004	FV-03-003,FV-03-004,BA-03-001,BA-03-002	3 78	min °C	PCG-I-DTI-00-00-01_0	13-CV-03-001-SA-IC3
7	AK-01	Alarma de tiempo	TT-02-004	FV-03-003,FV-03-004,BA-03-001,BA-03-003	1	h	PCG-I-DTI-00-00-01_0	13-CV-04-001-SA-IC3
8	AK-02	Alarma de tiempo	TT-02-004	FV-03-003,FV-03-004,BA-03-001,BA-03-003	1	h	PCG-I-DTI-00-00-01_0	13-CV-04-001-SA-IC3

3.2.3. Lista de señales

Las señales permiten determinar los tipos de entradas que se utilizarán en el controlador, así como el tag que se deben asignar al controlador lógico programable.

Tabla 3

Lista de señales

Lista de Señales						Programación		Documento				
No.	Tag DTI	Equipo asociado	Tipo de dato	Estado	Servicio	PLC		Proyecto				
						Localidad de memoria PLC	Tag PLC	DTI	No. De Línea	I/O Tipo	Unidades	Hoja de Datos
1	FC0201	Válvula de control	AO	[0,100%]	Recirculación	QW80	FC0201	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	AO	N/A	PCG-I-HD-00-0001-VALVULAS DE CONTROL
2	FT0201	Transmisor de flujo	CLK	[1,25 l/s]	Recirculación	MD230	FLU01	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	DI	l/s	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE FLUJO FTXXXX
3	FV0201	Válvula solenoide	BOOL	[0,1]	Recirculación	Q0.0	FV0201	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	DO	N/A	PCG-I-HD-00-0001-VALVULAS SOLENOIDES
4	FV0202	Válvula solenoide	BOOL	[0,1]	Recirculación	Q0.1	FV0202	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	DO	N/A	PCG-I-HD-00-0001-VALVULAS SOLENOIDES
5	FV0303	Válvula solenoide	BOOL	[0,1]	Procesamiento	Q0.2	FV0303	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	DO	N/A	PCG-I-HD-00-0001-VALVULAS SOLENOIDES
6	FV0304	Válvula solenoide	BOOL	[0,1]	Procesamiento	Q0.3	FV0304	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	DO	N/A	PCG-I-HD-00-0001-VALVULAS SOLENOIDES
7	IS0201	Interruptor de corriente	BOOL	[0,1]	Recirculación	I1.0	IS0201	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	DI	N/A	PCG-I-HD-00-0001-INTERRUPTOR DE CORRIENTE
9	PT0201	Transmisor de presión	MD	[0,100 psi]	Recirculación	IW112	PT0201	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	AI	bar	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE PRESION
10	PT0202	Transmisor de presión	MD	[0,100 psi]	Recirculación	IW114	PT0202	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	AI	bar	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE PRESION
11	PT0203	Transmisor de presión	MD	[0,1000 psi]	Recirculación	IW116	PT0203	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	AI	bar	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE PRESION
12	PT0404	Transmisor de presión	MD	[0,1000 psi]	Enfriamiento	IW118	PT0404	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-04-001-SA-IC2	AI	bar	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE PRESION
16	TT0201	Transmisor de temperatura	MD	[-50,150 °C]	Recirculación	IW122	TT0201	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	AI	°C	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE TEMPERATURA
17	TT0202	Transmisor de temperatura	MD	[-50,150 °C]	Recirculación	IW124	TT0202	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	AI	°C	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE TEMPERATURA
18	TT0203	Transmisor de temperatura	MD	[-50,150 °C]	Recirculación	IW176	TT0203	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	AI	°C	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE TEMPERATURA
19	TT0204	Transmisor de temperatura	MD	[-50,150 °C]	Recirculación	IW178	TT0204	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	AI	°C	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE TEMPERATURA
20	TT0405	Transmisor de temperatura	MD	[0,100 °C]	Enfriamiento	IW120	TT0405	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-04-001-SA-IC2	AI	°C	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE TEMPERATURA
21	TT0506	Transmisor de temperatura	MD	[0,100 °C]	Fermentación	IW126	TT0506	PCG-I-DTI-00-00-01_0	13-CV-05-001-SA-IC3	AI	°C	PCG-I-HD-00-0001-TRANSMISOR DE TEMPERATURA
22	BA0201	Bomba de agua	BOOL	[0,1]	Recirculación	Q8.0	BA0201	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-001-SA-IC1	DO	N/A	-
23	BA0202	Bomba de agua	BOOL	[0,1]	Recirculación	Q8.4	BA0202	PCG-I-DTI-00-00-01_0	19-AG-02-002-SA-IC2	DO	N/A	-
24	BA0301	Bomba de agua	BOOL	[0,1]	Procesamiento	Q8.5	BA0301	PCG-I-DTI-00-00-01_0	13-CV-03-001-SA-IC3	DO	N/A	-
25	BA0401	Bomba de agua	BOOL	[0,1]	Enfriamiento	Q8.2	BA0401	PCG-I-DTI-00-00-01_0	13-CV-03-001-SA-IC3	DO	N/A	-
26	CA0201	Boiler	PWM	[0,100%]	Recirculación	Q8.1	CA0201	PCG-I-DTI-00-00-01_1	19-AG-02-002-SA-IC2	DO	N/A	-

3.3. Filosofía de operación

La filosofía de operación es un documento que indica el funcionamiento del sistema, se sustenta en un DFP y brinda la información necesaria para el control de los procesos en el sistema.

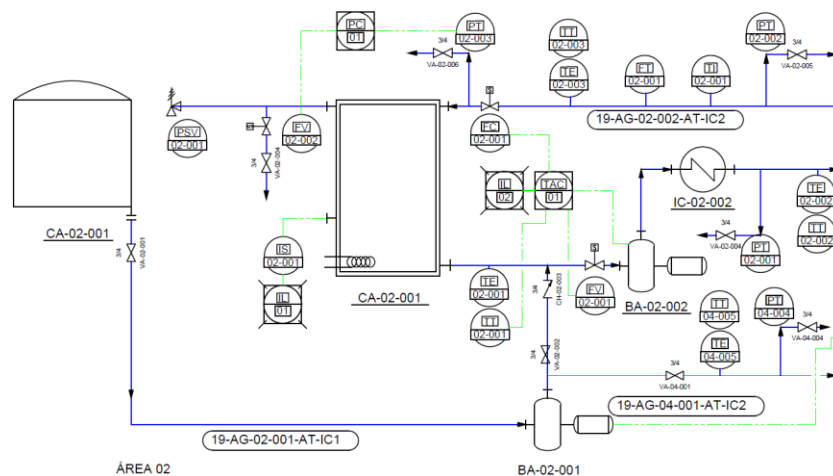
En este sentido, se han considerado normas oficiales de instrumentación ANSI/ISA-5.1 2009 para la simbología de control de cada uno de los procesos. De esta manera, se asegura la estandarización y la correcta identificación de los distintos equipos y procesos en el sistema de la Planta Cervecera Geotérmica (PCG).

3.3.1. Llenado del sistema

En primer lugar, se deben abrir las válvulas VA-02-001, FV-02-001 y FC-02-001 para permitir el flujo de agua desde el recipiente atmosférico RA-02-001 y llenar el sistema. A continuación, se lleva a cabo el proceso de purga de la tubería con el fin de eliminar cualquier aire presente en el sistema. Para esto, se deben abrir y cerrar las válvulas VA-02-005, VA-02-006 y VA-04-005 hasta que se observe la ausencia de aire en el sistema. Una vez que se ha completado la purga, se inicia el proceso de precalentamiento. En la **Ilustración 41** se muestran las válvulas y los equipos que se mencionan.

Ilustración 41

Esquema de la secuencia de llenado en el DTI



3.3.2. Precalentado

En el Área 02 se debe realizar la siguiente secuencia de operación para que el agua de proceso que estará en la olla de cocción (que por sus características será considerada como un

intercambiador de calor denominado IC-02-001), se caliente de temperatura ambiente hasta los 78 °C.

En el IC-02-001, se vierten 24 litros de agua potable. Esto garantiza 20 litros en la maceración, pues al tener evaporación, se deja agua extra para ser esparcida al final.

Mientras, en el circuito de recirculación del Área 02 se abren todas las válvulas de purga ubicadas en los sensores de presión, así como las válvulas digitales y de control. A continuación, se abren las válvulas FV-02-001 y FC-02-001 para que el agua de recirculación fluya del RA-02-001 al circuito, a medida que el circuito se va llenando, por las válvulas de purga comenzará a salir agua. Se inicia la purga con la válvula VA-02-001 que está ubicada en el punto más bajo del arreglo. Al ver que comienza a verter agua se cierra la PSV-02-001 y la VA-02-004 se deja ¼ de vuelta abierta, esto servirá para regular el flujo de la válvula de alivio de presión y con ello despresurizar el circuito sin perder mucha agua en él.

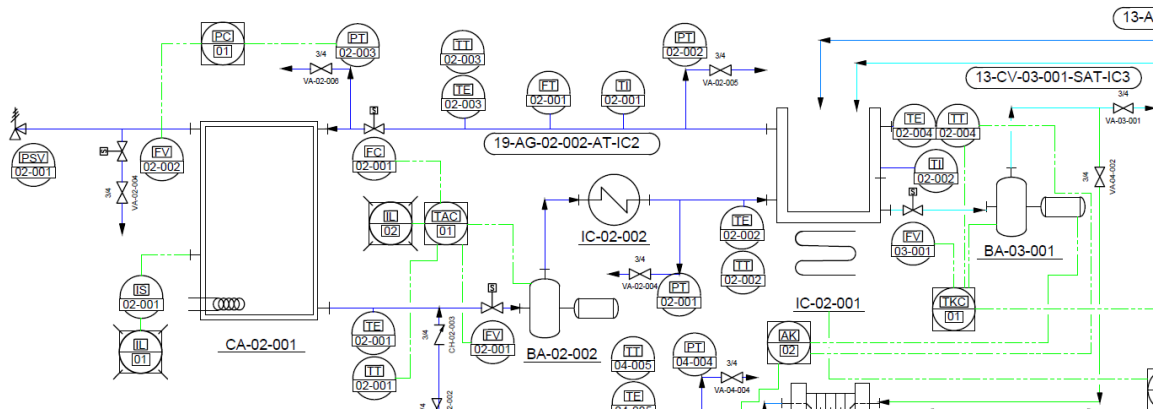
A medida que se va llenando el sistema en cada válvula de purga donde está un sensor, al observar que comienza a verter agua; el sistema se debe purgar hasta verificar que deja de salir aire de la tubería y únicamente se tenga agua.

Al confirmar que el circuito está lleno, se cierran las válvulas digitales, así como las de control restante y se enciende el CA-02-001. Al calentarse el agua contenida en este tanque, se incrementará gradualmente la presión; para proteger las válvulas digitales, se abrirá la FV-02-002 cuando la presión indique 5 Bar y se cerrará al llegar a 3.5 Bar. En caso de que no se accione la FV-02-002 y la presión llegue a 10 Bar, se acciona la PSV-02-001, que es la válvula de alivio, mecánica. Este proceso se mantendrá hasta que el agua en CA-02-001 llegue a los 80 °C, será entonces que tanto FV-02-001 como FC-02-001 se abrirán al 100% y se accionará la BA-02-002 que deberá descargar 0.9 Bar más que su presión de succión para que el flujo del sistema sea de 0.33 kg/s de agua. El circuito se mantendrá recirculando hasta que la temperatura del agua en IC-02-001 llegue a los 78 °C, mientras tanto la FV-02-002 se mantendrá regulando la presión del calentador eléctrico.

Al llegar el agua de recirculación a 78 °C se apagarán tanto CA-02-001 así como BA-02-001 y FV-02-001 y FC-02-001 se dejarán 100% abiertas. La indicación de este proceso se muestra en la **Ilustración 42**.

Ilustración 42

Esquema de la secuencia de precalentado en el DTI.



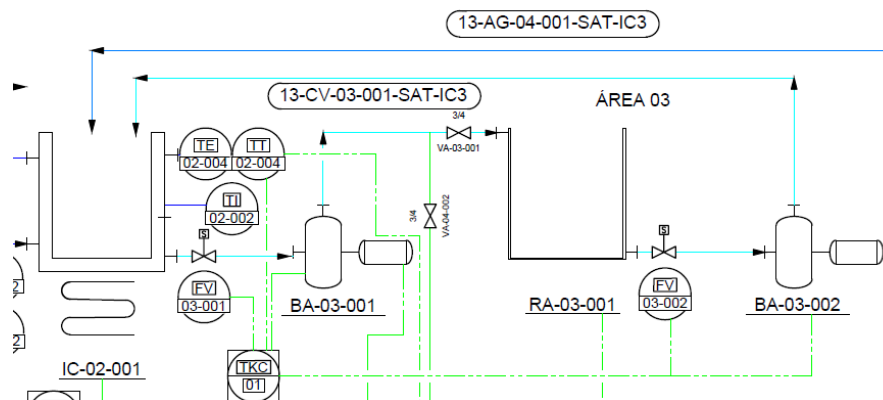
3.3.3. Maceración

Con el agua en IC-02-001 a 78°C, se abre FV-03-003 y se acciona BA-03-001 hasta bombear el 95% del agua hacia RA-03-001, el cual debe taparse al llenarse y apagar BA-03-001. RA-03-001 se quedará cerrado durante una hora.

Treinta minutos antes de que se cumpla la hora de maceración, se deben encender CA-02-001 y BA-02-002. En IC-02-001 se verterá agua hasta tener una altura de 7.5 cm y, faltando 5 min antes de la hora de maceración, se accionará BA-03-001 para extraer agua de IC-02-001 hasta dejar una altura de 4 cm. Posteriormente se enviará a un contenedor externo. Se debe mantener el circuito de recirculación encendido. Se puede ver en el diagrama de la secuencia de maceración en la **Ilustración 43**.

Ilustración 43

Esquema de la secuencia de maceración en el DTI

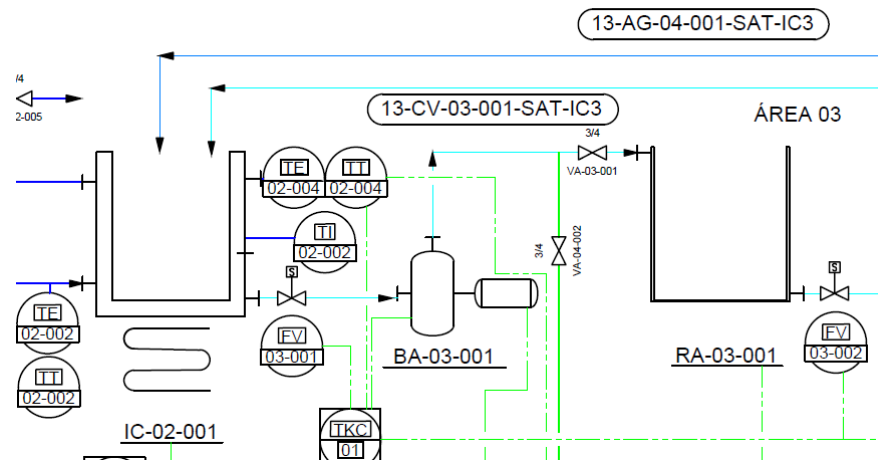


3.3.4. Hervor

Al terminar la hora de maceración, se accionará BA-03-002 para enviar la mezcla de agua y cerveza a IC-02-001. En la parte final del vaciado, se verterá el agua caliente que se separó en el depósito externo, sobre la bolsa con la preparación para extraer el máximo de la mezcla. La válvula FC-02-001 se cerrará un 65% para que el agua en el circuito de recirculación alcance los 94 °C. Para ello se debe censar la temperatura del agua en IC-02-001 y, una vez que alcance los 93 °C, se mantendrá así el sistema por una hora, con lo que termina la etapa de hervor, observada en la **Ilustración 44**.

Ilustración 44

Esquema de la secuencia de hervor en el DTI



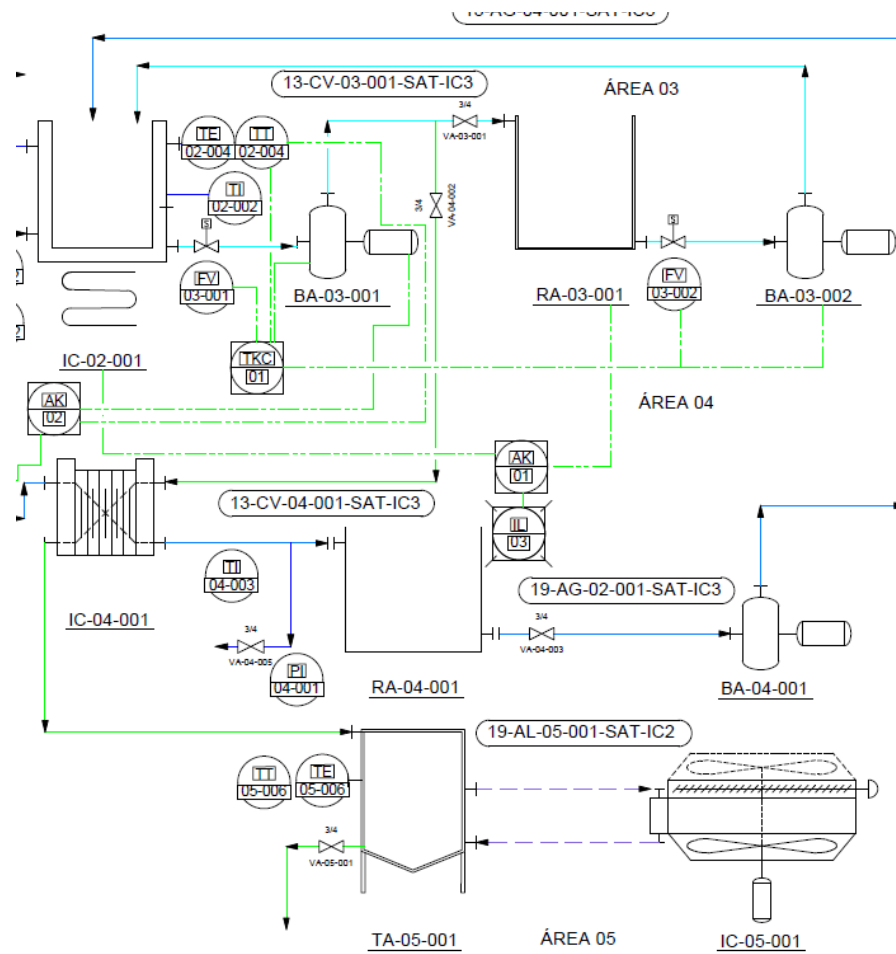
3.3.5. Enfriamiento

Al terminar la etapa de hervor, la cerveza se debe enfriar lo más rápido posible de 93 °C hasta 20 – 22 °C. Para ello se usa la línea 9 y se acciona la BA-03-001 para que pase por el IC-04-001 cediendo calor y bajando su temperatura hasta los 22 °C. A contraflujo se acciona la BA-02-001 para enviar agua fría por la línea 11 hacia el IC-04-001, con lo cual, se elevará su temperatura hasta los 40 – 45 °C.

La cerveza fría se envía directamente al fermentador denominado TA-05-001 para que se quede fermentando durante 12 días. El agua caliente se envía al depósito RA-04-001 para usarse en la limpieza de los recipientes y del sitio de trabajo. Se aprecia la etapa de enfriamiento en la **Ilustración 45**.

Ilustración 45

Esquema de la secuencia de enfriamiento en el DTI



3.4. Especificación de instrumentos

Las especificaciones de los instrumentos se registrarán con base en el Sistema Internacional de Unidades en su mayoría, en el caso particular de la temperatura se emplearán unidades del SI derivadas y la presión.

Tabla 4

Sistema de unidades

Magnitud	Nombre	Símbolo
Longitud	Metro	m
Masa	Kilogramo	kg

Magnitud	Nombre	Símbolo
Tiempo	Segundo	s
Corriente eléctrica	Ampere	A
Temperatura	Grado Celsius	°C
Presión	Bar	bar
Flujo másico	Flujo	l/s

Los instrumentos de monitoreo y de control serán especificados en función de sus características particulares del proceso. En general tendremos dos tipos de instrumentos:

- Indicadores
- Transmisores

Los valores de medida se presentarán en unidades de ingeniería, y no deben excederse de dos unidades decimales.

Cada instrumento se estará etiquetando con base en la norma ISA-5.5-1985, donde lo identificaremos con máximo cuatro letras; las primeras tres representarán el nombre del instrumento y la cuarta será la posición o número de componente, por ejemplo:

- TT01: Donde TT representará el nombre del instrumento y 01 es el número del componente.

Los parámetros principales que deberán ser especificados son:

- Tipo de función
 - Registrador
 - Indicador
 - Control
 - Transmisor
- Tipo de carcasa

- Estándar del fabricante
- Tamaño nominal
- Color
 - Estándar del fabricante
 - Color especial
- Tipo de montaje
 - Balancín (Yoke)
 - Flush (Descarga)
 - Superficial
- Protección
 - Propósito general
 - Protección contra agua
 - Protección a explosión
 - Clase IP
 - Sistemas intrínsecamente seguros
- Alimentación
 - AC
 - DC
- Tipo de escala
 - Ajustable
 - Fija
 - Por rango
- Salida de transmisor
 - 0 a 20mA
 - 4 a 20 mA
 - Voltaje por rango
- Elemento sensor

- Diafragma
- Capilar
- Bourdon
- Pozo
- Otro

Estas especificaciones serán anotadas en una hoja de datos por cada instrumento ocupado en la PCG, un ejemplo de llenado de estas hojas es el siguiente, como se observa en la **Ilustración 46**:

Ilustración 46

Hoja de datos de indicadores de presión

Hoja de datos Indicador de presión		Hoja 1 Esp. Num.	De 1 Rev. A.
Num.	Por	Fecha	Revisión
1	BGI	28/04/2023	A
Fecha: 28/04/2023			
Solicitud de pedido			
Creado por:		Revisado:	Aprobado:
Bici		raico	IBAAJ
<p>1. Tipo: Lectura directa [X] Receptor 3-15 [] Otro: _____</p> <p>2. Montaje: Superficial [X] Local [] Flush []</p> <p>3. Diámetro: 2.5 in. _____ Color: _____</p> <p>4. Carcasa: Hierro fundido [] Aluminio [] Phenol [] Otro: ASM 304 SS</p> <p>5. Anillo: Aberrillado [X] Bisagra [] Slip [] 5/8 []</p> <p>ASB 304 SS, Gimp-On</p> <p>6. Protección contra explosiones: Ninguna [X] Back [] Disco []</p> <p>7. Lente: Vidrio [] Plástico [] Otro: Polycarbonate</p> <p>8. Opciones: Silicon [] Material _____</p> <p>Amortiguador []</p> <p>Valvula de presión límite</p> <p>Movimiento de amortiguación</p> <p>9. Exactitud nominal requerida: +/- 1.5%</p>			
<p>10. MFR & Num. De modelo: 253v/63/11 Rango: 0-11 kg/cm²</p> <p>11. Elemento de presión: Bourdon [X] Bellows []</p> <p>12. Element Mnt: Bronce [] Acero [X]</p> <p>13. Socket Mnt: Bronce [] Acero [X]</p> <p>Otro: ASM 316 SS</p> <p>14. Conexión NPT: 1/4 in. [X] 1/2 in. [] Otro: _____</p> <p>15. Movement: Bronce [] SS [] Nylon []</p> <p>Otro: Lubin</p> <p>16. Sello del diafragma</p> <p>MFG: Silicon Rubber, Tipo _____</p> <p>Wanted Part Mtl: Filling plug Otro Mtl _____</p> <p>Fill Fluid: Silicone _____</p> <p>Process Conn. _____</p> <p>Gage Conn. _____</p>			
Rev. Quan.	Tag Num.	Rango	Presión Operacional
A	PI001	0 - 150 psi	1.75 bar
			Servicio
			Enfriamiento
NOTAS			

Para examinar todas las hojas de datos de los equipos es necesario consultar el anexo 7.4.

3.5. Diseño de tablero de control

El sistema de monitoreo y control estará gestionado por un tablero eléctrico. Por tanto, es imprescindible diseñar un diagrama que exhiba todos los componentes eléctricos que se utilizarán

en el sistema. El objetivo principal de este diagrama es prevenir cualquier accidente o daño a los componentes.

En el diagrama se deben incluir todos los elementos eléctricos relevantes, como interruptores, fusibles, relés, transformadores, medidores, entre otros. Además, es importante garantizar una correcta disposición y conexión de los componentes, siguiendo las normas y estándares de seguridad eléctrica.

Un diseño de diagrama preciso y detallado ayudará a los operadores y técnicos a comprender y mantener el sistema de monitoreo y control de manera eficiente y segura. Asimismo, facilitará la identificación y resolución de posibles problemas o fallas en el futuro.

3.5.1. Diagrama trifilar eléctrico

Se presenta un diagrama trifilar que muestra varios componentes importantes. En primer lugar, se destaca la presencia de un seccionador que tiene la función de suministrar energía a todos los equipos utilizados en el control de la PCG. Asimismo, el diagrama incluye diversas protecciones para los equipos asociados y muestra la forma en que deben interconectarse.

Es crucial asegurar que el diagrama refleje correctamente la disposición y conexión de los componentes eléctricos, así como las medidas de protección necesarias para salvaguardar el funcionamiento seguro y eficiente del sistema. Esto implica tener en cuenta aspectos como fusibles, interruptores de protección, dispositivos de seguridad y cualquier otro elemento relevante.

El diagrama trifilar nos proporcionará una representación visual clara y precisa de la configuración del sistema eléctrico, facilitando la comprensión y el mantenimiento adecuado de los equipos, como se ve en la **Ilustración 47**, así como la lista de los equipos en la **Tabla 5** y el anexo **7.7**.

Ilustración 47

Diagrama trifilar eléctrico

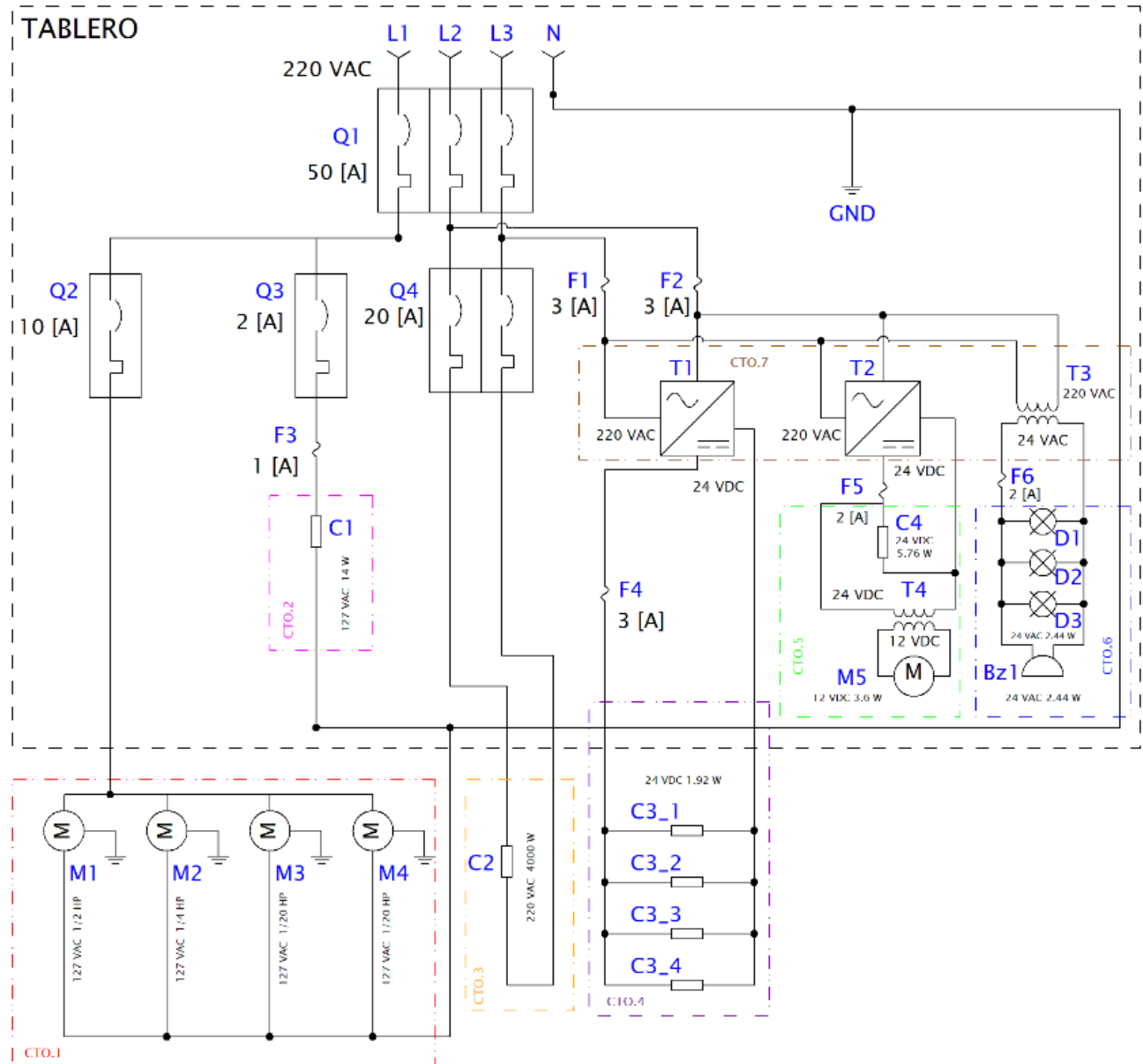


Tabla 5
Componentes eléctricos

SÍMBOLO	NOMBRE	SÍMBOLO	NOMBRE
Bz1	ZUMBADOR	L2	FASE DE 110 VAC
C1	PLC SIEMENS S7-1200	L3	FASE DE 110 VAC
C2	CALENTADOR ELÉCTRICO	M1	BOMBA BOOSTER
C3	VÁLVULAS SENOIDALES	M2	BOMBA DE RECIRCULACIÓN
C4	HMI	M3	BOMBA DE HERVOR
D1	LED VERDE	M4	BOMBA DE FERMENTACIÓN
D2	LED AMARILLO	M5	VENTILADOR
D3	LED ROJO	N	NEUTRO
F1	FUSIBLE 3 [A]	Q1	TERMOMAGNÉTICO 50 [A]
F2	FUSIBLE 3 [A]	Q2	TERMOMAGNÉTICO 10 [A]
F3	FUSIBLE 1 [A]	Q3	TERMOMAGNÉTICO 2 [A]
F4	FUSIBLE 3 [A]	Q4	TERMOMAGNÉTICO 20 [A]
F5	FUSIBLE 2 [A]	T1	TRANSFORMADOR DE 220 VAC A 24 VDC
F6	FUSIBLE 2 [A]	T2	TRANSFORMADOR DE 220 VAC A 24 VDC
GND	TIERRA FÍSICA	T3	TRANSFORMADOR DE 220 VAC A 24 VAC
L1	FASE DE 110 VAC	T4	TRANSFORMADOR DE 24 VDC A 12 VDC

3.5.2. Análisis de cargas y protecciones eléctricas

Para asignar las protecciones adecuadas a los elementos eléctricos, es fundamental realizar un balance de potencia eléctrica considerando todos los componentes que se utilizarán en la PCG. Es esencial determinar la suma total de potencias requeridas por los equipos, ya que si se excede la corriente eléctrica permitida, podría ocasionar daños y el mal funcionamiento de los equipos.

En la **Tabla 6** se presenta detalladamente la potencia consumida por cada uno de los equipos necesarios para la automatización de la PCG. Este registro de potencia permitirá tomar decisiones informadas sobre la selección y configuración de las protecciones eléctricas requeridas, como disyuntores, fusibles u otros dispositivos de seguridad, con el objetivo de garantizar la integridad de los equipos y el correcto funcionamiento del sistema en su conjunto.

Tabla 6

Potencias nominales de equipos eléctricos

EQUIPOS ELÉCTRICOS				
SÍMBOLO	TENSIÓN DE OPERACIÓN [V]	ALIMENTACIÓN AC/DC	CORRIENTE NOMINAL [A]	POTENCIA NOMINAL [W]
Bz1	24	AC	0.10	2.44
C1	127	AC	0.11	14
C2	220	AC	18.18	4000
C3	24	DC	0.08	1.92
C4	24	DC	0.24	5.76
D1	24	AC	0.10	2.44
D2	24	AC	0.10	2.44
D3	24	AC	0.10	2.44
M1	127	AC	3.50	444.5
M2	127	AC	2.15	273.05
M3	127	AC	0.29	37.28
M4	127	AC	0.29	37.28
M5	12	DC	0.30	3.6
T1	220	AC	0.35	76.8
T2	220	AC	0.22	48
T3	220	AC	1.82	400
T4	24	DC	0.63	15

Una vez obtenidas todas las potencias de los equipos eléctricos, es importante realizar la suma de estas potencias según la línea de alimentación indicada en el diagrama eléctrico. Esto permitirá asignar las protecciones correspondientes de manera adecuada. En la siguiente tabla se muestra la suma de las potencias de los equipos asignados y las protecciones correspondientes.

Tabla 7

Suma de potencias de los equipos eléctricos

TENSIÓN 220 VAC 3 FASES									
EQUIPOS	POTENCIA [W]	CTO. NO.							TOTAL
		1	2	3	4	5	6	7	
Bz1	2.44						1		1
C1	14		1						1
C2	4000			1					1
C3	1.92				4				4
C4	5.76					1			1
D1	2.44						1		1
D2	2.44						1		1
D3	2.44						1		1
M1	444.5	1							1
M2	273.05	1							1
M3	37.28	1							1
M4	37.28	1							1
M5	3.6					1			1
T1	76.8							1	1
T2	48							1	1
T3	400							1	1
T4	15					1			1
POTENCIA TOTAL [W]		792.1	14	4000	7.68	24.36	9.76	524.8	5372.71
CORRIENTE TOTAL [A]		6.237	0.11	18.18	0.32	1.015	0.407	2.385	28.66

TENSIÓN 220 VAC 3 FASES

EQUIPOS	POTENCIA [W]	CTO. NO.							TOTAL
		1	2	3	4	5	6	7	
TERMOMAGNÉTICO [A]		10	2	20					50
FUSIBLE [A]					3	2	2	3	
CALIBRE DE CABLE [AWG]		14	18	10	18	18	18	16	
FASE L1		792	14						806.00
FASE L2				4000				525	4525.00
FASE L3				4000				525	4525.00

En este capítulo, se planteó todo el diseño necesario para controlar la cervecería geotérmica. Se obtuvo el diagrama de flujo y de proceso para desarrollar el DTI. A través de este proceso, se identificaron los elementos eléctricos requeridos para el diseño del tablero eléctrico y se realizaron los cálculos de los componentes de potencia, asegurándose de colocar las protecciones necesarias para evitar daños en los equipos, con base en nuestra tabla de suma de potencia es que se seleccionaron estas protecciones.

Con toda la información y planificación previa, se puede proceder a la programación del PLC y a la construcción del tablero eléctrico, así como al montaje del sistema geotérmico.

4. Implementación de la instrumentación y el control de la cervecera artesanal geotérmica

En este capítulo se abordará todo el contenido relacionado con la instrumentación y el control de la cervecera geotérmica. Se describe el ensamblaje del sistema, incluyendo la incorporación de los instrumentos de monitoreo, como los sensores de temperatura, presión y flujo. Estos sensores se someten a un control de calidad para asegurar la precisión de los datos obtenidos.

Asimismo, se presenta el montaje del tablero de control. Una vez que se describe la instalación de los equipos, se señalan las herramientas necesarias para implementar la filosofía de control previamente definida. Esta filosofía permite la programación del PLC y la implementación de los controladores PID y ON/OFF, optimizando el funcionamiento del sistema.

Por último, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, así como los costos asociados a la implementación de este proyecto.

4.1. Ensamble del tablero de control

En el ensamble del tablero eléctrico y de control, se siguieron las instrucciones del manual de instalación de Siemens para el PLC y los módulos. De la misma manera, se cumplió con los requisitos de la NOM-001-SEDE-2012 en cuanto a la selección de componentes eléctricos y protecciones.

Se utilizó un tablero con dimensiones de 500x600x200 mm para albergar los componentes, como se muestra en la **Ilustración 48**. La instalación se realizó de manera secuencial, comenzando con el PLC y los SSR de las bombas, que son los instrumentos de mayor importancia en el funcionamiento del sistema. Esta disposición permitió una adecuada ventilación de los componentes. Además, se instalaron filtros de aire en las esquinas inferior y superior del tablero para establecer un ducto de ventilación eficiente. Un ventilador ubicado en la parte inferior del tablero también contribuyó a la circulación de aire.

Con estos enfoques en el ensamble del tablero eléctrico y de control, se buscó garantizar un funcionamiento seguro y confiable del sistema.

Ilustración 48

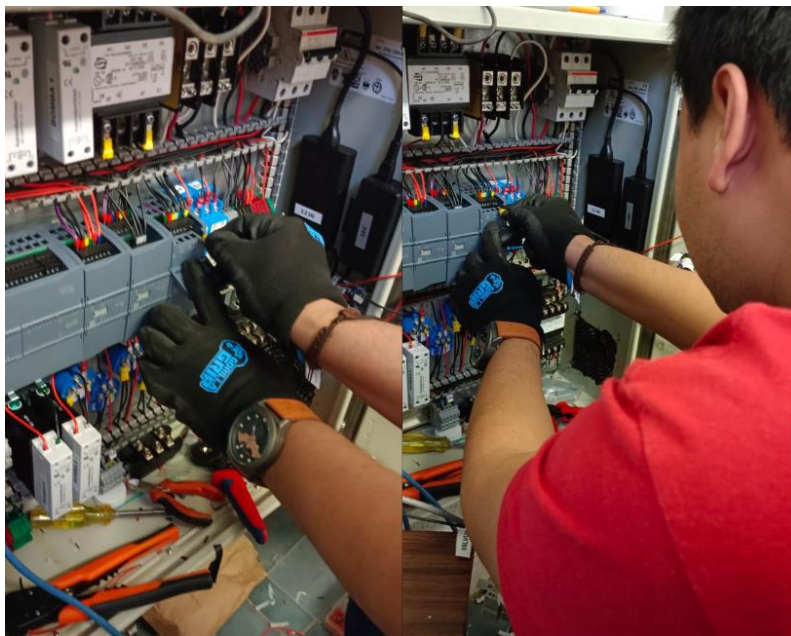
Ensamble de componentes del tablero de control



Después de realizar el análisis de cargas, se llevó a cabo la selección del tipo de cableado a utilizar en el sistema. Estos pueden consultarse en la *Tabla 7*, ya que en ella se encuentra la capacidad de corriente nominal que se utilizará.

Ilustración 49

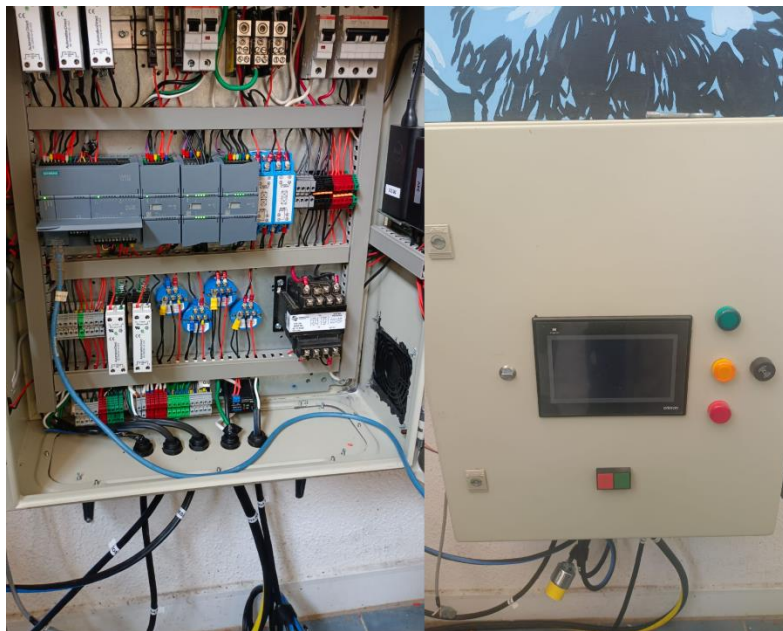
Cableado del tablero de control



Como se aprecia en la **Ilustración 49**, además de la selección del cableado, se implementaron **clemas**¹² y canaletas para mantener el orden y la seguridad en el sistema. Estos elementos permiten una conexión adecuada de los cables y evitan posibles cortocircuitos o problemas de conexión. El tablero proporciona un espacio organizado y seguro para el cableado y los dispositivos eléctricos, facilitando así el monitoreo y control del sistema, el tablero ensamblado se muestra en la **Ilustración 50**.

Ilustración 50

Tablero de monitoreo y control



4.2. Instalación del sistema de instrumentación y control

El prototipo fue instalado en el Laboratorio de Geotermia del Instituto de Ingeniería de la UNAM, siguiendo el enfoque proporcionado por el DFP y el DTI. La instalación del sistema se llevó a cabo en varias etapas:

En primer lugar, se procedió a la instalación de los equipos necesarios, como las ollas, el calentador eléctrico y el recipiente de agua. Estos elementos son fundamentales para la recolección y distribución del calor geotérmico en el sistema.

¹² Las clemas permiten conectar y desconectar cables de manera fácil y rápida sin necesidad de soldadura. Son muy comunes en aplicaciones industriales y en la instalación de sistemas eléctricos y electrónicos, ya que facilitan la conexión y evitan el desorden de cables sueltos.

Posteriormente, se hizo la instalación de la tubería de acuerdo con las especificaciones proporcionadas en el DFP. La tubería es esencial para el transporte y circulación eficiente del fluido geotérmico a lo largo del sistema.

Finalmente, se implementó la instrumentación del sistema; dicha implementación se ve en la **Ilustración 51**. Esto implicó la colocación de sensores de temperatura y presión en puntos estratégicos del equipo. Esos sensores fueron previamente calibrados para garantizar mediciones precisas y confiables. Además de los sensores, se incorporaron válvulas solenoides y de control en el mismo. Estas válvulas desempeñan un papel crucial en el manejo y regulación de los diferentes procesos que se utilizarán en el sistema. La PCG se aprecia en la **Ilustración 52**.

Ilustración 51

Instalación del sistema de instrumentación y control de la PCG



Ilustración 52

Cervecería geotérmica



4.3. Programación de instrumentos de monitoreo

Con el PLC, se podrán ingresar los instrumentos de monitoreo necesarios para tener el control de la cervecería geotérmica. Estos instrumentos incluyen sensores de temperatura, presión y flujo, que proporcionarán las variables requeridas para el control del sistema. Cabe destacar que cada instrumento requiere una programación específica, ya que los sensores de presión y temperatura trabajan con entradas analógicas de 4-20 mA, mientras que el sensor de flujo necesita una entrada digital para activar los contadores rápidos de frecuencia en el PLC.

4.3.1. Sensores de temperatura y presión

Los sensores de temperatura y presión utilizados en el sistema son entradas analógicas que requieren la conversión de la magnitud física en una señal de corriente de 4-20 mA. Para lograr esto, se requieren transductores.

En el proceso de programación del PLC Siemens utilizando la interfaz TIA Portal, se utilizaron dos bloques principales. El primero es el bloque NORM_X, el cual se encarga de normalizar los datos provenientes de las entradas analógicas. Esto implica ajustar y escalar la señal para su correcta interpretación y procesamiento.

El segundo bloque utilizado fue el SCALE_X, el cual permite establecer una escala de valores para la entrada analógica. Esto es fundamental para relacionar la magnitud física medida con su correspondiente valor numérico en el sistema. La programación de los bloques se muestra en la **Ilustración 53**.

Ilustración 53

Bloques de normalización y escala



Los bloques NORM_X y SCALE_X se incorporaron en una función debido a que cada transmisor de presión y temperatura requería de estos bloques para su correcto funcionamiento. La diferencia entre cada uno de ellos radicaba en la dirección de entrada analógica proporcionada por el módulo del PLC.

En el caso de los sensores de temperatura, se establecieron escalamientos definidos, ya que los transductores de temperatura utilizados en el tablero fueron seleccionados con base en las temperaturas específicas que se esperaban en el sistema. Sin embargo, para los sensores de presión se puede hacer la modificación de los valores mínimos y máximos de escalamiento, ya que los transductores correspondientes se encontraban en los propios sensores. Además, se agregaron unos comparadores de la señal de entrada para que el tag diera el valor de 0 una vez que el transductor se encuentre desconectado.

De esta manera, se completó la programación de los sensores con la configuración mencionada, asegurando una correcta interpretación y procesamiento de las señales analógicas obtenidas. La programación de los transmisores de temperatura y presión se aprecian en la **Ilustración 54** e **Ilustración 55**.

Ilustración 54

Programación de transmisores de temperatura

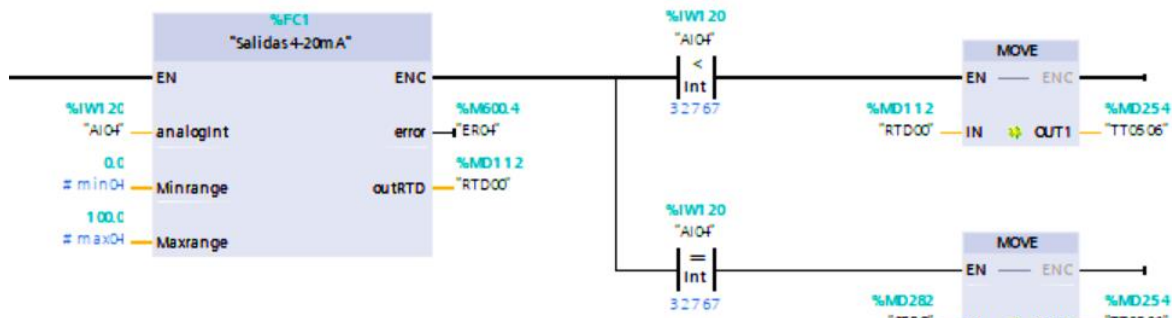
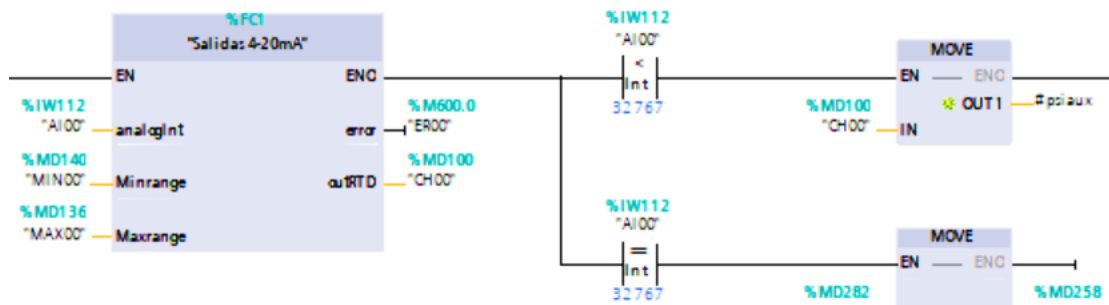


Ilustración 55

Programación de transmisores de presión



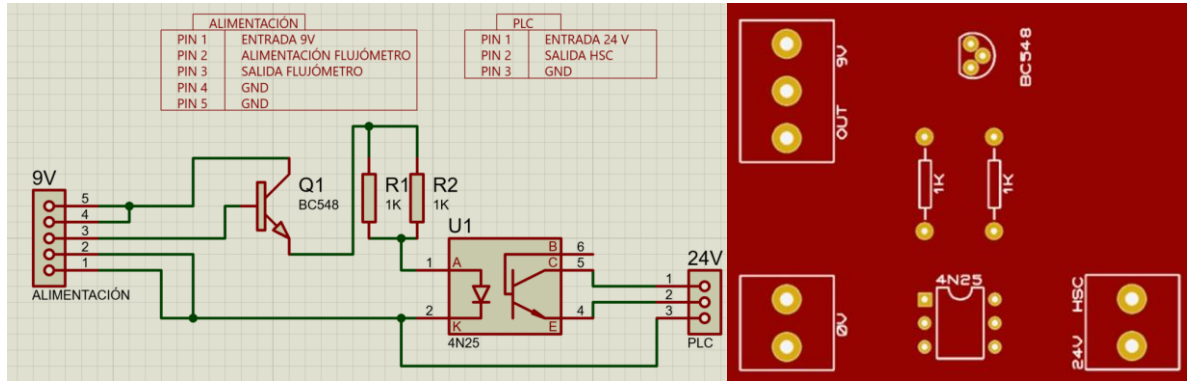
4.3.2. Sensores de flujo

Para la integración de los sensores de flujo, se requiere el uso de un High-Speed Counter (HSC), el cual se conecta a través de las entradas digitales del PLC. Sin embargo, estas entradas digitales necesitan un voltaje mínimo de 18V a 24V para su activación. En el caso de nuestro flujómetro, su salida mínima es de 4.5V, por lo que es necesario utilizar un circuito externo compuesto por un transistor y un optoacoplador para generar una entrada de 24V.

Este circuito adicional, que está presente en la **Ilustración 56**, permite amplificar y adaptar la señal del flujómetro para cumplir con los requisitos de voltaje de las entradas digitales del PLC.

Ilustración 56

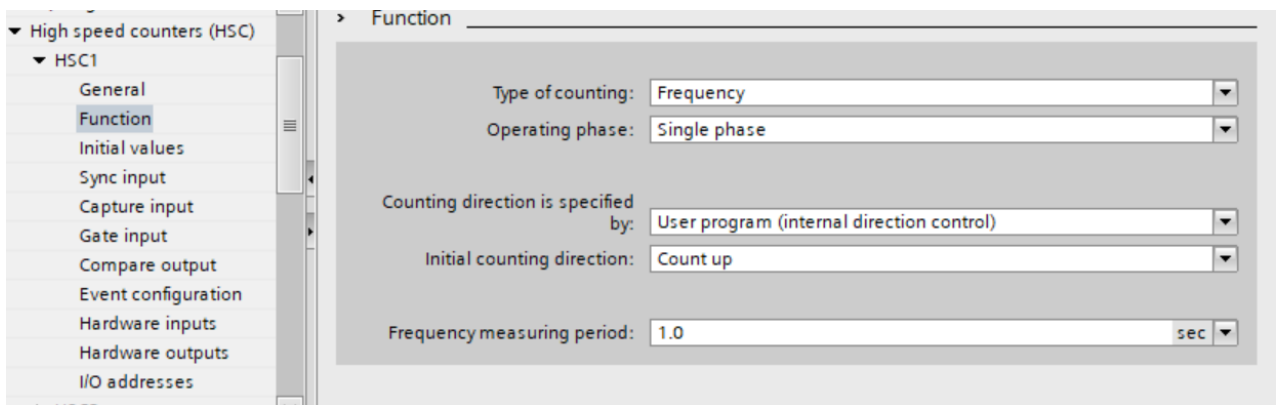
Diseño de PCB para circuito del flujómetro



Una vez instalado el circuito en la entrada digital, debemos de programar el HSC - como se observa en la **Ilustración 57**- para que la señal cuadrada pueda ser leída, para esto se debe configurar nuestro PLC en el apartado de HSC, colocando las características de frecuencia, fase simple y con un conteo ascendente, además de seleccionar la entrada digital del PLC en donde se hará el conteo.

Ilustración 57

Configuraciones del HSC



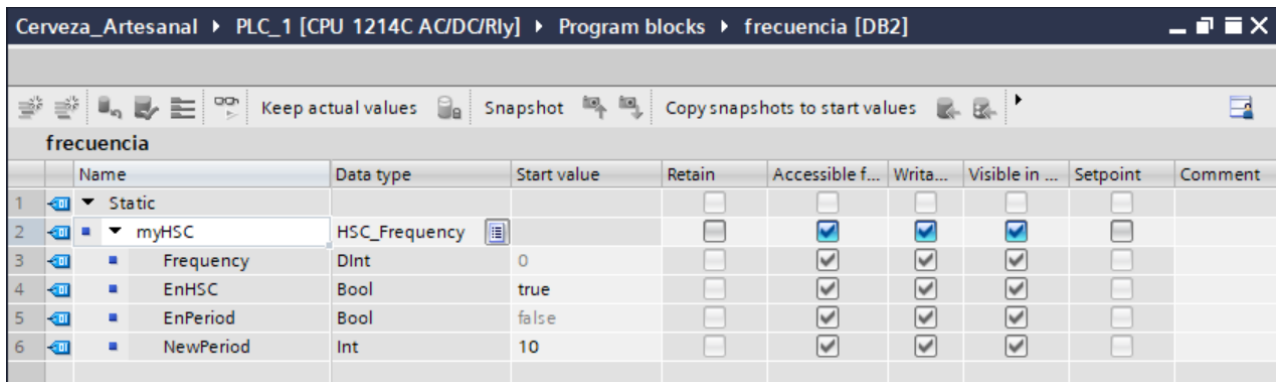
Por otro lado, se debe crear un nuevo bloque de datos en el cual se inicializará una variable denominada "myHSC" con el tipo de dato HSC_frequency. Al crear esta variable, se inicializarán automáticamente algunas variables predefinidas. Sin embargo, es necesario realizar la modificación de dos variables específicas.

La primera modificación consiste en cambiar el valor de la variable "EnHSC" a "true". Esto permitirá que el sistema reconozca y active el funcionamiento del HSC.

La segunda modificación implica ajustar el valor de la variable "NewPeriod" a 10. Al cambiar este valor, se establece un nuevo período para la medición y conteo de los pulsos generados por el HSC. Es importante ajustar este valor de acuerdo con los requisitos y características específicas del sistema.

Ilustración 58

Configuración de los datos del HSC



	Name	Data type	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Comment
1	Static			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	myHSC	HSC_Frequency		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	Frequency	DInt	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	EnHSC	Bool	true	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	EnPeriod	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	NewPeriod	Int	10	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Una vez completada la configuración del HSC, como se aprecia en la **Ilustración 58**, se procederá a utilizar un bloque de programación denominado CTRL_HSC. En este bloque, se deberá especificar la dirección de la frecuencia del contador, así como el bloque de datos previamente creado.

Al realizar esta configuración, el sistema estará preparado para detectar y medir las frecuencias correspondientes al flujo. La frecuencia es proporcional al caudal. El factor de conversión de frecuencia (Hz) a caudal (L/min) varía entre modelos y depende de la presión, densidad e, incluso, del mismo caudal. La fórmula ocupada en nuestro modelo es:

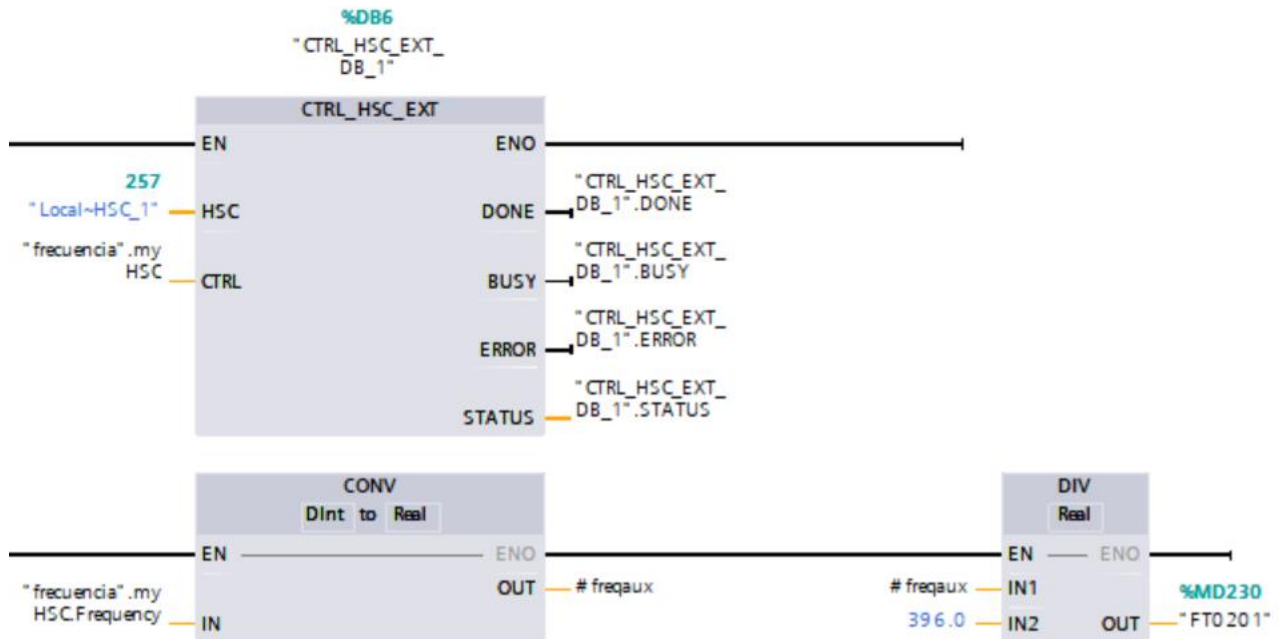
$$f(\text{Hz}) = 6.6 * Q \left(\frac{\text{L}}{\text{min}} \right)$$

Donde 6.6 es nuestro factor de conversión dada por el fabricante del sensor, f es la frecuencia de entrada y Q nuestro caudal, con esto programamos nuestro bloque y usamos uno de conversión

y división para tener el caudal en $\left(\frac{L}{seg}\right)$. Finalmente, la programación del HSC se aprecia en la **Ilustración 59**.

Ilustración 59

Programación de HSC



4.3.3. Monitoreo en HMI

Para el monitoreo de los sensores de presión, temperatura y flujo, se requirió la creación de una pantalla en la interfaz hombre-máquina (HMI). En esta pantalla, se debieron añadir bloques de texto que permitan visualizar los datos correspondientes a los tags definidos en el DTI. Para llevar a cabo esta tarea, se utilizó el software NB-Designer para programar el HMI de Omron.

Además de mostrar los datos de monitoreo, se incluyó un esquema del DTI en la pantalla del HMI. Este esquema ayudó a ubicar visualmente las posiciones en las que se está llevando a cabo el monitoreo. De esta manera, el usuario podrá identificar de manera más clara las señales que presenta el sistema y comprender su estado actual.

La **Ilustración 60** e **Ilustración 61** evocan las pantallas de monitoreo.

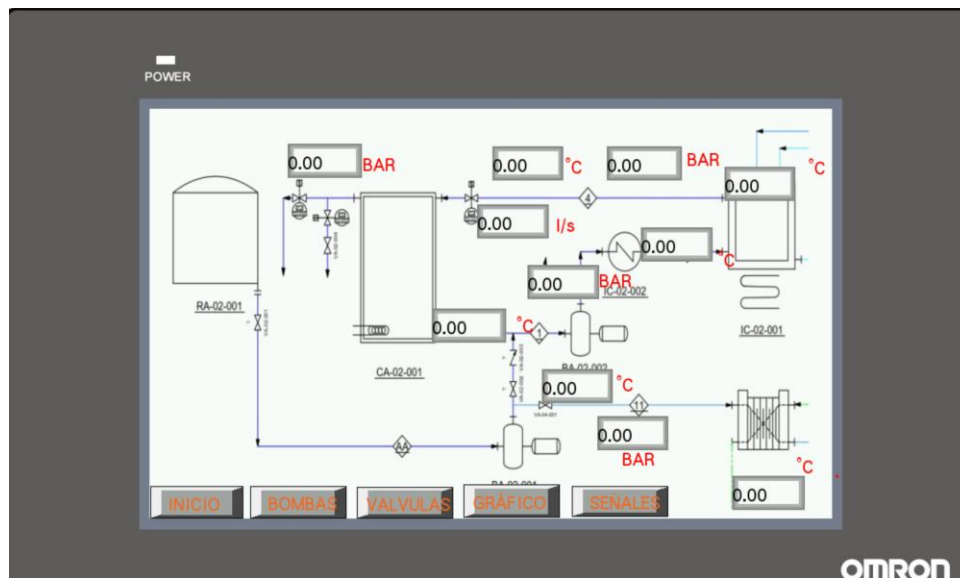
Ilustración 60

Pantalla de monitoreo de señales en HMI



Ilustración 61

Pantalla de monitoreo con gráfico en HMI



4.4. Control de calidad

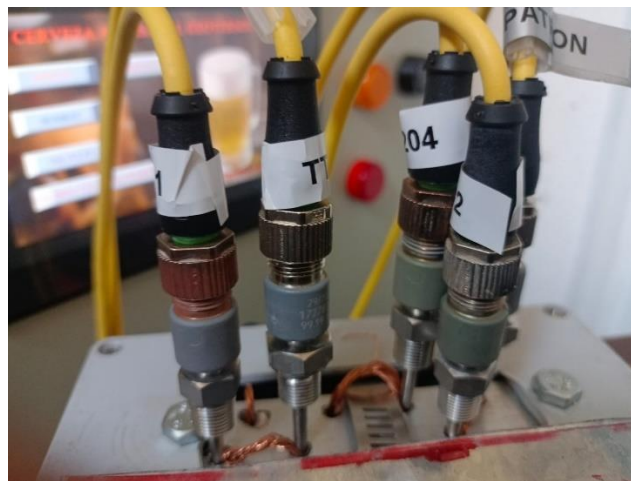
Es importante destacar que los sensores de temperatura y presión deben ser sometidos a un proceso de calibración regular para verificar su precisión y garantizar su correcto funcionamiento. La calibración implica comparar las lecturas de los sensores con valores de referencia conocidos y realizar ajustes si es necesario. Este procedimiento se lleva a cabo utilizando equipos de calibración especializados y siguiendo protocolos establecidos. Al calibrar los sensores, se verifica que estén en condiciones óptimas y listos para funcionar con precisión, lo que contribuye a obtener mediciones confiables y precisas en el sistema en el que están instalados. Para saber más acerca de la calibración de los sensores de temperatura, se recomienda consultar el anexo 7.8; y para los sensores de presión, se puede consultar el anexo 7.9.

4.4.1. Resultados de calibración de sensores de temperatura

Se realizaron las iteraciones de los instrumentos modificando el setpoint entre 45°C, 60°C y 100°C. Con esto se puede tener una curva de calibración para verificar si es óptimo nuestro instrumento para ser utilizado en nuestro sistema o en cualquier otro. La **Ilustración 62** ejemplifica la calibración.

Ilustración 62

Calibración de sensores de temperatura



Para realizar la calibración de los instrumentos de temperatura, tanto los indicadores como los transmisores, se elabora una hoja de calibración, la cual se observa en la **Ilustración 63**. En ella,

se indica el método utilizado, las iteraciones y los porcentajes de error de exactitud y precisión. Esto se hace para verificar que los instrumentos sean óptimos para su uso.

Ilustración 63

Hojas de calibración de sensores de temperatura

LUGAR DE CALIBRACION

Torre de Ingeniería, P. 7mo. Ab. 1a. c. Instituto de Ingeniería, Laboratorio de Sensores y Energías Alternas, Ciudad Universitaria, México, D.F.

IDENTIFICACION DEL INSTRUMENTO A CALIBRAR

Nombre: Indicador de Temperatura Etiqueta: T5403
Marca: UTECO
Modelo: BR-18
Rango: 0°C a 200°C (32°F a 392°F)
Resolución: 1°C (1.8°F)

IDENTIFICACION DEL INSTRUMENTO CALIBRADO

Nombre: PRT-100 Etiqueta: VALOR 19.3020
Marca: Omega
Modelo: RTD-100PT-30A300A1A
Rango: -50°C a 300°C (F a 500°F)
Resolución: 0.1°C (0.18°F)

METODO

En un baño de temperatura que funciona mediante corriente eléctrica a medida de la resistencia del resistor en un baño de agua helada y en un baño de agua a una presión de saturación que sea controlada en un baño de aceite. El tiempo de estabilización, calculado, la temperatura de referencia, con los sensores a calibrar se introducen en el material, que sea verificado el valor indicado en el tiempo de estabilización de 15 minutos, para tener los valores correspondientes, realizando una prueba durante 3 iteraciones.

RESPONSABLES DE LA CALIBRACION

Dr. Daniel Rodríguez González-Orellana
Eduardo González Hernández

RESULTADOS DE CALIBRACION

Valor real (°C)	Substrato nominal (°C)	Indicador nominal (°C)	Indicador real (°C)	Valor real (°C)	Valor real (°C)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Valor real (°C)	Porcentaje de error (%)	Desviación estándar (°C)	Desviación estándar (porcentaje %)	Desviación estándar (porcentaje %)	Desviación estándar (porcentaje %)	Desviación estándar (porcentaje %)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

CONDICIONES DE CALIBRACION

Fecha de calibración: 01/01/2023

Los instrumentos de temperatura utilizados en el sistema fueron óptimos para su uso, como se puede verificar en los resultados de calibración que se encuentran en el anexo 7.5.

4.4.2. Resultados de calibración de sensores de presión

Al igual que los sensores de temperatura, se realizaron unas hojas de calibración -como se observa en la Ilustración 64- para los sensores de presión transductores e indicadores, para verificar que los instrumentos son óptimos para su uso.

Ilustración 64

Hojas de calibración de sensores de presión

LUGAR DE CALIBRACION

Torre de Ingeniería, P. 7mo. Ab. 1a. c. Instituto de Ingeniería, Laboratorio de Sensores y Energías Alternas, Ciudad Universitaria, México, D.F.

IDENTIFICACION DEL INSTRUMENTO A CALIBRAR

Nombre: Indicador de Presión Etiqueta: P5001
Marca: UTECO
Modelo: PPT-20
Rango: 0 psi a 200 psi (0 bar a 14 bar)
Resolución: 1 psi (0.07 bar)

IDENTIFICACION DEL INSTRUMENTO CALIBRADO

Nombre: Sensores de presión
Marca: Omega
Modelo: PPT-20
Rango: 0 psi a 200 psi (0 bar a 14 bar)
Resolución: 0.1 psi (0.007 bar)

METODO

Se usó un baño de temperatura, utilizando un baño de agua helada y un baño de agua a una presión de saturación que sea controlada en un baño de aceite. El tiempo de estabilización, calculado, la temperatura de referencia, con los sensores a calibrar se introducen en el material, que sea verificado el valor indicado en el tiempo de estabilización de 15 minutos, para tener los valores correspondientes, realizando una prueba durante 3 iteraciones.

RESPONSABLES DE LA CALIBRACION

Dr. Daniel Rodríguez González-Orellana
Eduardo González Hernández

RESULTADOS DE CALIBRACION

Valor real (psi)	Substrato nominal (psi)	Indicador nominal (psi)	Indicador real (psi)	Valor real (psi)	Valor real (psi)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Valor real (psi)	Porcentaje de error (%)	Desviación estándar (psi)	Desviación estándar (porcentaje %)	Desviación estándar (porcentaje %)	Desviación estándar (porcentaje %)	Desviación estándar (porcentaje %)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

CONDICIONES DE CALIBRACION

Fecha de calibración: 01/01/2023

Los instrumentos de temperatura utilizados en el sistema fueron perfectos para su uso, como se puede verificar en los resultados de calibración que se encuentran en el anexo 7.6.

4.5. Filosofía de control

La importancia del control en la PCG radica en que este proceso consume mucho tiempo para llevarse a cabo. Por lo tanto, se plantea la generación de un control del proceso de producción de cerveza que permitirá reducir los tiempos y registrar los datos necesarios para elaborar cerveza artesanal de manera más efectiva.

4.5.1. Modo de operación

El sistema PCG será semi-automático, ya que la mayoría de las bombas y válvulas serán controladas por el PLC. No obstante, en algunos casos será necesaria la manipulación manual para que el sistema continúe con su proceso automático.

4.5.2. Control de bombas

Las bombas serán controladas a través del PLC en un proceso semi-automático, ya que su activación dependerá de la secuencia que el usuario implemente. Para ello, se utilizará un módulo de salidas de 24VDC y un SSR.

4.5.3. Control de válvulas

Las válvulas serán en su mayoría automáticas y semiautomáticas. Una de ellas se encargará automáticamente del alivio de la presión del calentador eléctrico para evitar que ésta sobrepase los 10 bar que éste soporta. Sin embargo, las válvulas se vuelven semiautomáticas debido a que su activación o desactivación dependerá de la secuencia que el usuario proporcione.

4.5.4. Secuencias

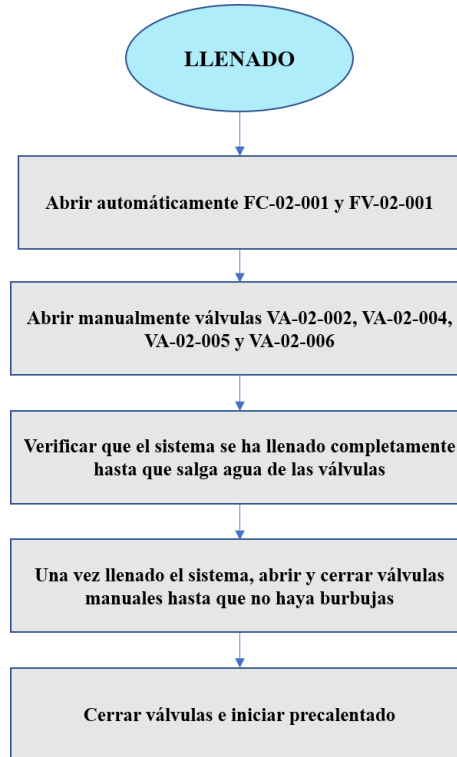
Las secuencias del sistema serán controladas con base en el DTI que se encuentra en anexo **7.3**, en este apartado se plantea cómo será llevado a cabo el control de la PCG para obtener de resultado final la cerveza artesanal. Se utiliza nomenclatura bajo la NORMA ANSI/ISA-5.1 2009.

Para comprender mejor las secuencias se recomienda ver el anexo **7.3** donde se encuentra el DTI del sistema.

4.5.4.1. Secuencia de llenado

Ilustración 65

Diagrama de secuencia de llenado



La **Ilustración 65** señala la secuencia de llenado. Inicialmente, es necesario que el agua que proviene del RA-02-00 llene completamente las tuberías en el área 02 del sistema. Para ello, en el HMI se encontrará una secuencia de llenado que se activará al presionar un botón, lo que abrirá automáticamente las válvulas FC-02-001 y FV-02-001. Adicionalmente, el usuario deberá abrir manualmente las válvulas VA-02-002, VA-02-004, VA-02-005 y VA-02-006 -en ese orden- para que se visualice la salida de agua desde la que se encuentra a menor altura hasta la de mayor altura.

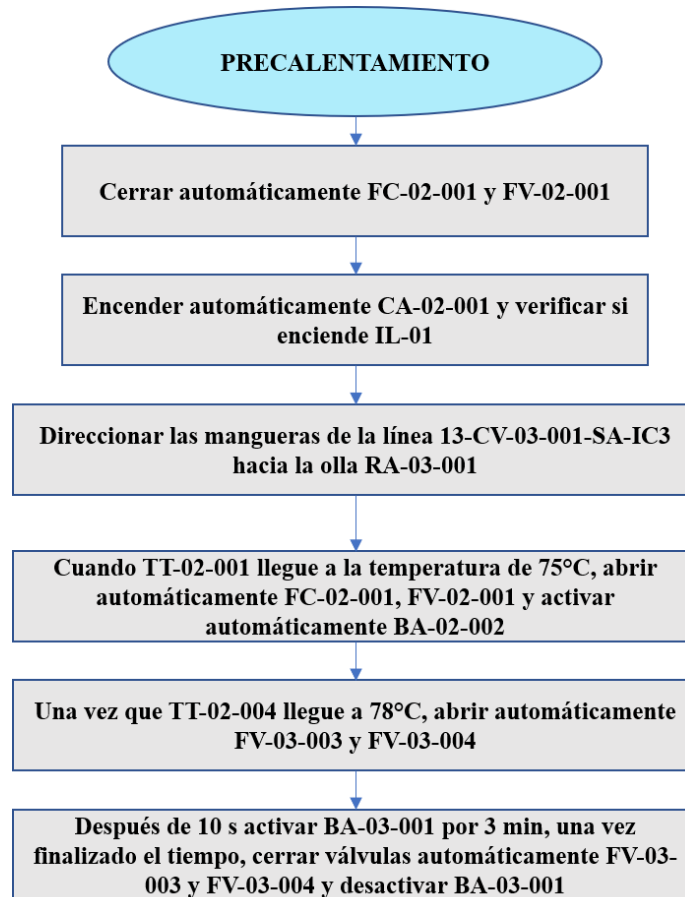
Posteriormente el sistema esté lleno de agua, se deberán cerrar manualmente todas las válvulas VA y volver a abrirlas hasta que no salgan burbujas de aire de las tuberías. Este procedimiento se realiza para eliminar todo el aire del sistema.

Finalmente, cuando el sistema esté completamente lleno, todas las válvulas deberán cerrarse y el usuario podrá dar inicio a la pantalla de precalentado.

4.5.4.2. Secuencia de precalentamiento

Ilustración 66

Diagrama de secuencia de precalentamiento



La **Ilustración 66** explica la secuencia de precalentamiento. Primeramente, el HMI estará en pantalla de precalentamiento y se seleccionará un botón que iniciará el precalentamiento. En este proceso estarán completamente cerradas las válvulas FC-02-001 y FV-02-001, y se encenderá CA-02-001, para indicar que éste se encuentre encendido, se utilizará un IS-02-001 que encenderá un IL-01; y este equipo mandará una alarma que indica que el sensor TT-02-001 ha llegado a la temperatura de 75 °C.

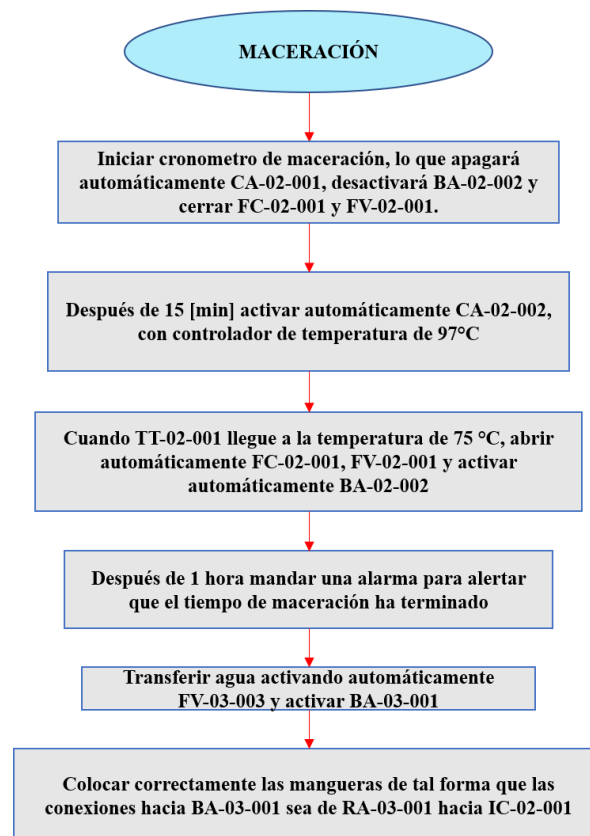
Después, el usuario deberá direccionar las mangueras de la línea 13-CV-03-001-SA-IC3 hacia la olla RA-03-001; CA-02-001 será controlado por un PID que tendrá como setpoint 85°C. Cuando TT-02-001 llegue a la temperatura de 75 °C, se abrirán FC-02-001 y FV-02-001, y se activará BA-02-002.

Por último, cuando TT-02-004 indique que tiene una temperatura de 78 °C, se deberán abrir FV-03-003 y FV-03-004 y después de 10 s se activará BA-03-001 por un tiempo de 3 min para que pase el agua a Ra-03-001. Una vez terminado el tiempo, se cerrarán FV-03-003 y FV-03-004 y se desactivará BA-03-001.

4.5.4.3. Secuencia de maceración

Ilustración 67

Diagrama de control de la secuencia de maceración



En la **Ilustración 67**, se aprecia cómo en la pantalla de maceración el usuario activará un botón que arrancará un Timer. Al iniciar el Timer, se apagará CA-02-001, se desactivará BA-02-002 y se cerrarán FC-02-001 y FV-02-001. Cuando el Timer llegue a 15 min. Encenderá CA-02-001, controlado por un PID hasta 97°C. Cuando TT-02-001 llegue a 75°C abrirá FC-02-001, FV-02-001 y activará BA-02-002. Una vez que el Timer llegue a 60 min, dará una alarma que alertará el usuario para que active el botón de transferir agua, lo que hará será abrir solamente FV-03-003

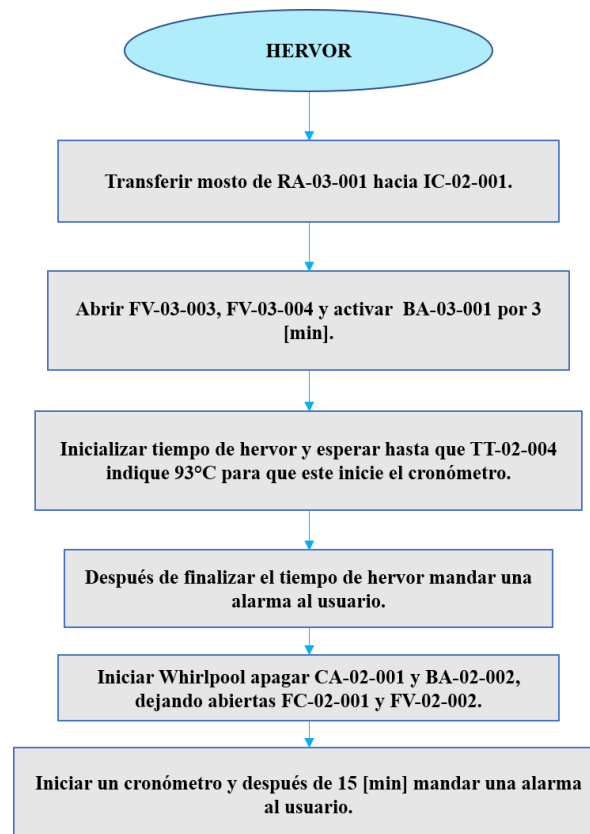
y activará BA-03-001 para que pase a una olla externa -siempre y cuando el usuario lo requiera- para lavar el mosto de RA-03-001.

Una vez que el usuario quiera lavar el mosto, se deben instalar las mangueras de tal forma que las conexiones hacia BA-03-001 sean de RA-03-001 hacia IC-02-001 para que así nos dirijamos a la pantalla de hervor.

4.5.4.4. Secuencia de hervor

Ilustración 68

Diagrama de secuencia de hervor



La **Ilustración 67** nos muestra cómo el usuario activará un botón para transferir el mosto de RA-03-001 hasta IC-02-001, lo que hará este botón es abrir FV-03-003, FV-03-004 y activará BA-03-001 por 3 min. Cuando esto termine, se recomienda al usuario que inicialice el tiempo de hervor. Hasta que TT-02-004 indique que se ha llegado a 93°C, se iniciará un Timer que, cuando llegue al tiempo inicializado por el usuario, mandará una alarma que anuncia el fin del hervor.

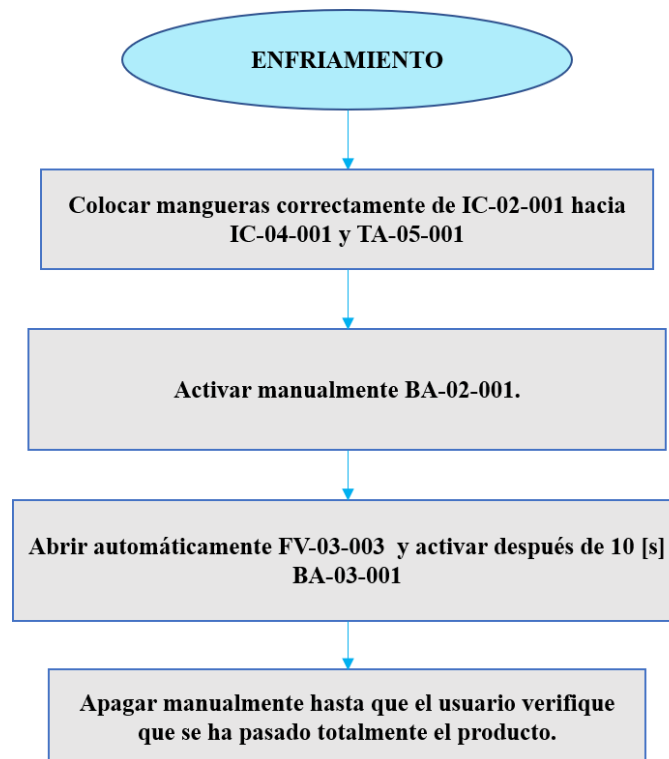
Una vez terminado el hervor, se tendrá un botón para activar el Whirlpool, que apagará CA-02-001 y BA-02-002, dejando abiertas FC-02-001 y FV-02-002, para que la presión no aumente y se pueda activar PSV-02-001.

Por último, activando el Whirlpool, iniciará un cronómetro que a los 15 min hará sonar una alarma para que se pueda iniciar el proceso de enfriamiento.

4.5.4.5. Secuencia de enfriamiento

Ilustración 69

Diagrama de secuencia de enfriamiento

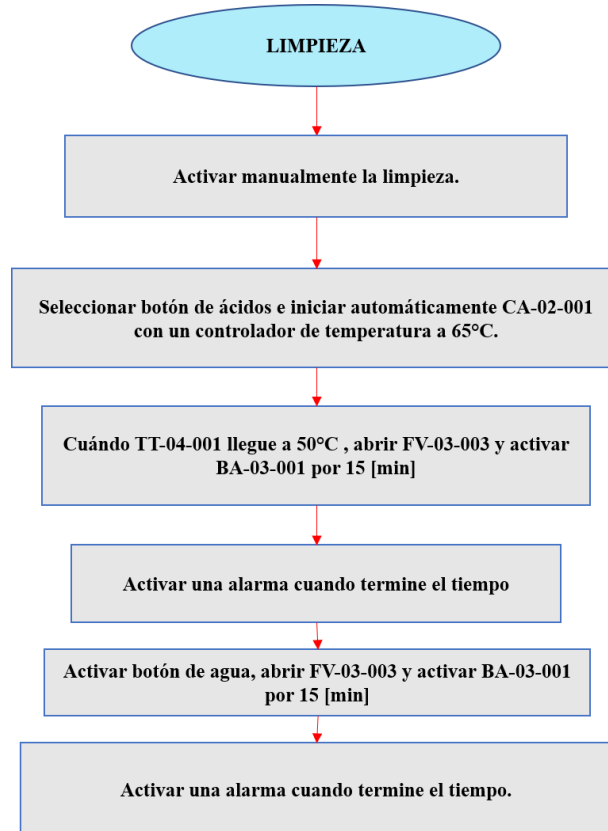


La **Ilustración 69** ejemplifica la secuencia de enfriamiento. En este paso el usuario requiere que las mangueras se muevan a la línea 13-CV-04-001-SA-IC3, ya que pasarán a través de IC-04-001 y, de esta manera, la cerveza llegará a TA-05-001. El usuario en la pantalla del HMI de enfriamiento puede activar un botón que accionará primero la bomba BA-02-001, posteriormente se abrirá la válvula FV-03-003 y después de accionar un Timer de 10 segundos, se activará BA-03-001 hasta que el usuario desactive el botón de enfriamiento.

4.5.4.6. Secuencia de limpieza

Ilustración 70

Diagrama de secuencia de limpieza



La **Ilustración 70** explica la secuencia de limpieza. En esta secuencia se van a requerir tres botones:

Primer botón “Activar limpieza”: Habilita los botones de ácidos y agua para realizar sus procedimientos.

Segundo botón “Ácidos”: CA-02-001 se encenderá y tendrá un controlador de 65°C. Se agregará agua a la olla IC-02-001; hasta que ésta esté a 50°C, se activará una alarma para que el usuario coloque las líneas 19-AG-04-001-SA-IC3 y después pueda activar el botón de circulación para que abra FV-03-003 y active BA-03-001 hasta que llegue a 15 min. Una vez que se cumpla ese tiempo, se dará una alarma para que el usuario pueda vaciar el agua con la bomba. Ésta seguirá así hasta que se desactive el botón de ácido o activar limpieza.

Tercer botón “Agua”: El usuario solo activará el botón de circulación para abrir FV-03-003 y activar BA-03-001 dando inicio a un Timer que, cuando llegue a 15 min, mande una alarma; así, el usuario puede vaciar el agua, apagar la bomba y cerrar la válvula cuando desactive el botón.

4.5.5. Alarmas

Durante el proceso, las alarmas activadas, serán identificadas a través de luces LED y un zumbador.

4.5.5.1. Filosofía de alarmas

En las secuencias del sistema, se presentarán las siguientes alarmas:

- **Alarma de encendido:** Esta alarma se activará para indicar que hay corriente eléctrica pasando por el calentador eléctrico. Se mostrará a través de un led verde.
- **Alarma de temperatura de calentador eléctrico:** Cuando la temperatura del calentador eléctrico alcance los grados estimados, se activará una alarma con un led amarillo y un buzzer.
- **Alarma de tiempo:** Una vez que los procesos en el sistema finalicen, se activará una alarma con un led rojo y un buzzer.

4.6. Programación de las secuencias de la cerveza artesanal

La programación del PLC es de vital importancia para llevar a cabo el control de la cervecería. Además, la programación del PLC se complementa con la del HMI, ya que el HMI proporciona una interfaz adecuada para que el usuario pueda ejecutar cada una de las secuencias requeridas en el proceso.

Cada secuencia de programación se realiza siguiendo la filosofía de operación y control previamente establecida, con el objetivo de obtener un resultado eficaz para la cervecería geotérmica.

4.6.1. Programación secuencia de llenado

Para la secuencia de llenado, se utilizará el módulo de salidas analógicas para controlar el voltaje de la válvula FC-02-001. Se emplearán nuevamente los bloques NORM_X y SCALE_X- que se muestran en la **Ilustración 71**, para regular la apertura. Además, se ha utilizado el tag

"ACT2" para controlar la apertura y cierre de la válvula FV-02-001. Con esta configuración de bloques, se procederá a programar el llenado del sistema.

Ilustración 71

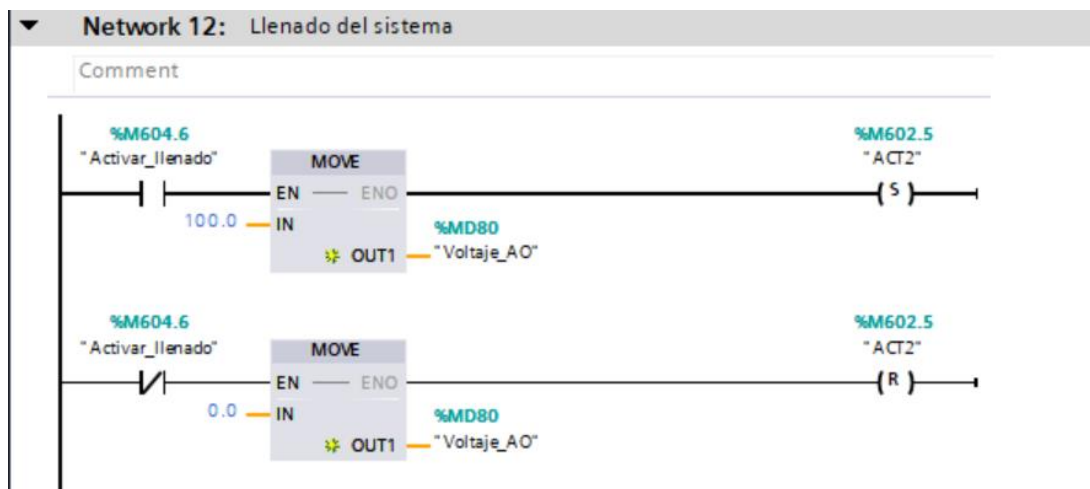
Programación de las válvulas FV-02-001 y FC-02-001



En la programación del llenado -que se visualiza en la **Ilustración 72**, se creará un tag denominado "Activar_llenado" que posibilita la apertura y cierre de las válvulas C-02-001 y FV-02-001. Mediante el bloque MOVE, se puede ajustar el valor del voltaje al 100% para lograr la apertura total, así como al 0% para el cierre completo. De esta manera, se lleva a cabo el llenado del sistema de acuerdo con la filosofía de control establecida en la secuencia de llenado.

Ilustración 72

Bloque de programación del llenado del sistema

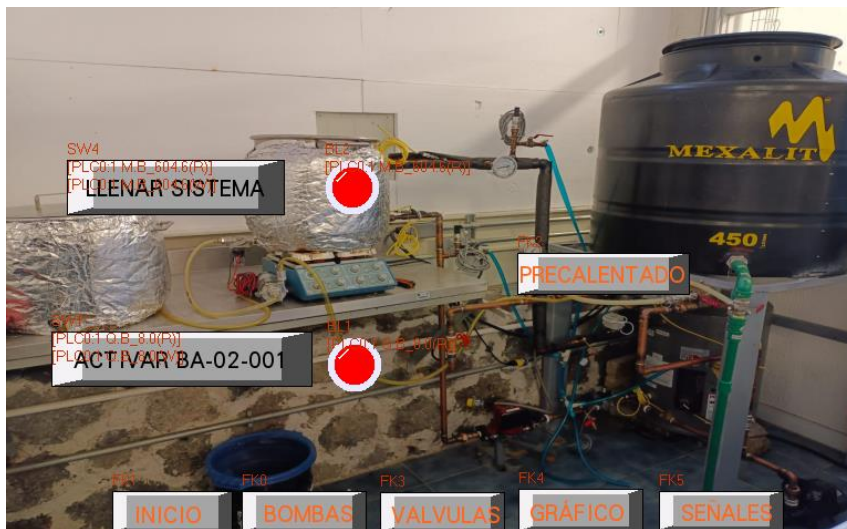


4.6.1.1. Secuencia de llenado en HMI

En el HMI se agregará una pantalla denominada "Llenado", la cual incluye dos botones. Uno de ellos direcciona hacia el botón "Activar_llenado" para iniciar el sistema, y cuenta con un bit de alarma que se muestra en verde cuando está activado y en rojo cuando está desactivado. Además, se incluirá otro botón para encender el dispositivo BA-01-001 y presurizar el sistema en caso de ser necesario; la bomba de igual manera tendrá un bit que indica si está encendido o no, con una luz verde y roja; por último, tiene un botón que nos direccionará a la pantalla de precalentado. La pantalla de llenado en el HMI se puede ver en la **Ilustración 73**.

Ilustración 73

Pantalla de llenado del sistema

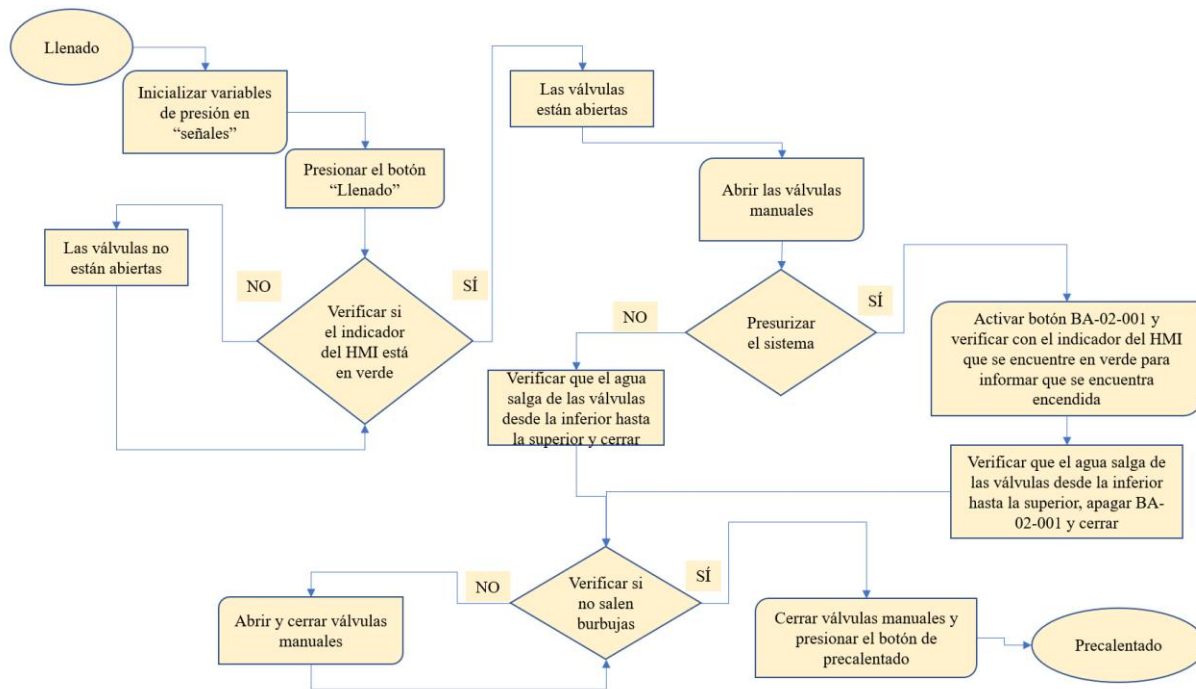


4.6.1.2. Manual de secuencia de llenado

En la **Ilustración 74**, se aprecian las instrucciones que el usuario debe seguir en la secuencia de llenado.

Ilustración 74

Diagrama de flujo de la secuencia de llenado

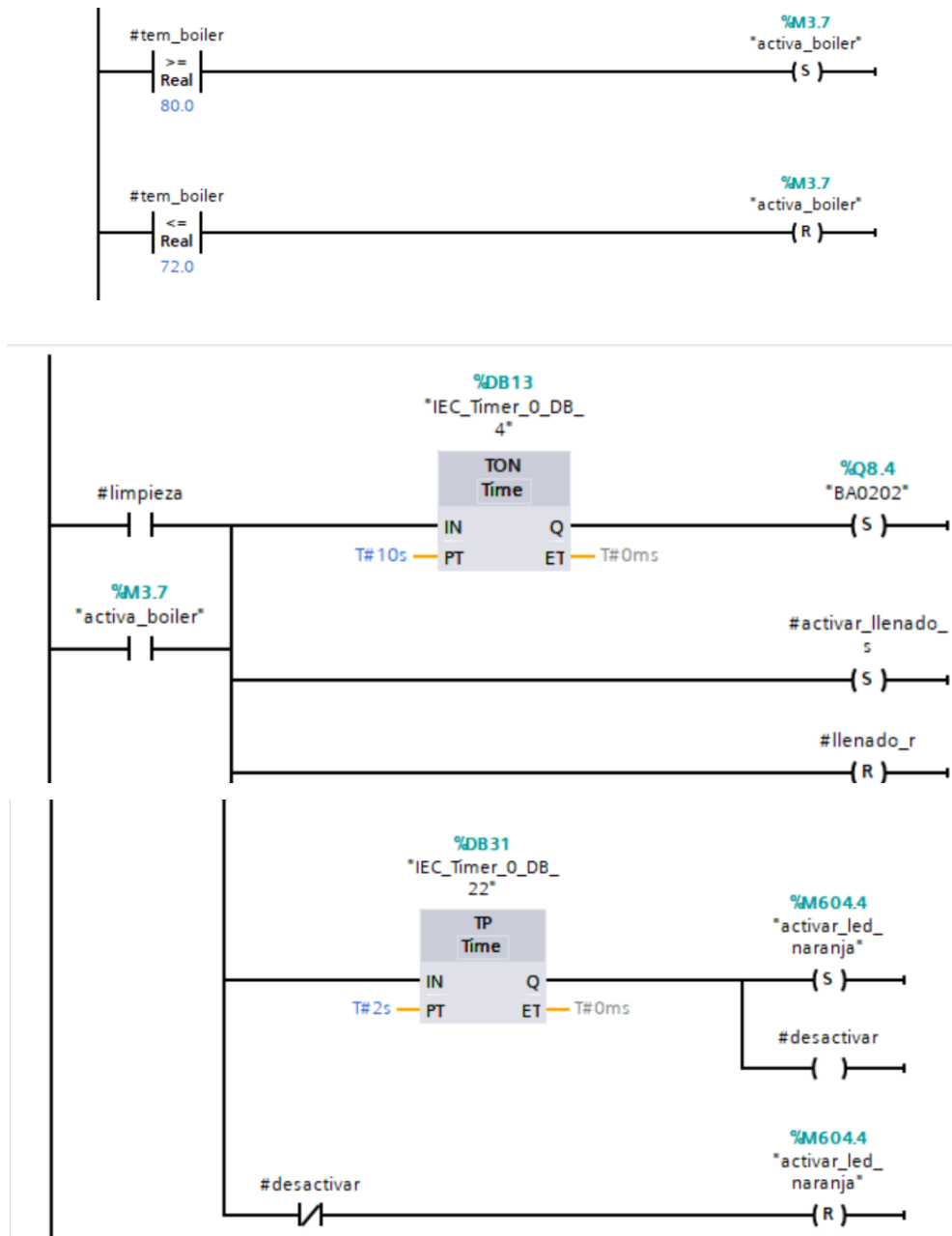


4.6.2. Programación secuencia de precalentado

Para la programación de la secuencia de precalentado, se ha creado una función de encendido del calentador eléctrico que se utilizará en diferentes etapas de nuestro proceso. En esta función, se han establecido dos entradas: "limpieza" y "temp_calentador eléctrico". Si la temperatura de CA-02-001 alcanza los 75°C, se activará el botón "activa_calentador eléctrico", lo que dará inicio al llenado del sistema según lo establecido en la secuencia. También se activará una alarma con un LED naranja para indicar que se está abriendo el sistema para la circulación. En caso de que la temperatura caiga por debajo de los 72°C, se realizará un reseteo del llenado del sistema para permitir que la temperatura vuelva a aumentar. La programación se muestra en la **Ilustración 75**.

Ilustración 75

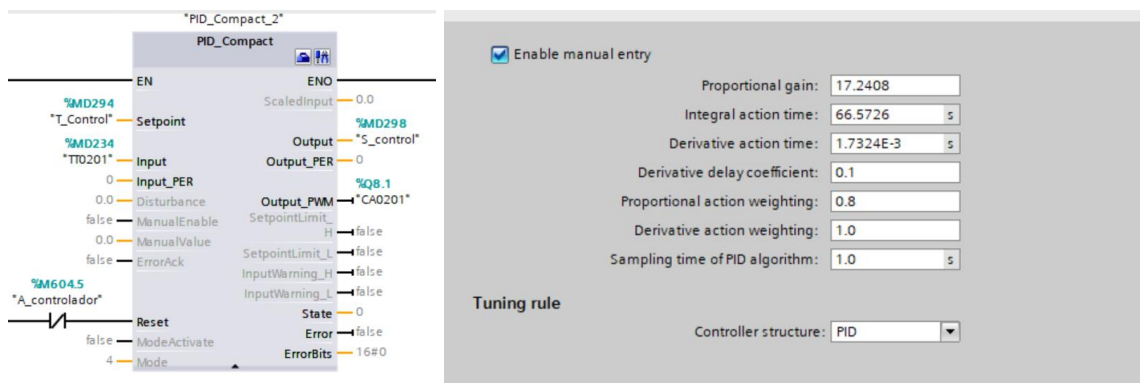
Programación de función de activar circulación de bomba.



Además, CA-02-001 requiere de un controlador de temperatura, este controlador se programará como el horno de temperatura ubicado en el anexo 7.8.3. Así, se requerirá de un controlador PID, con los parámetros de CA-02-001, esto con el fin de no sobrepasar la temperatura y que pueda abrir PSV-02-001.

Ilustración 76

Controlador PID de CA-02-001 con parámetros calculados

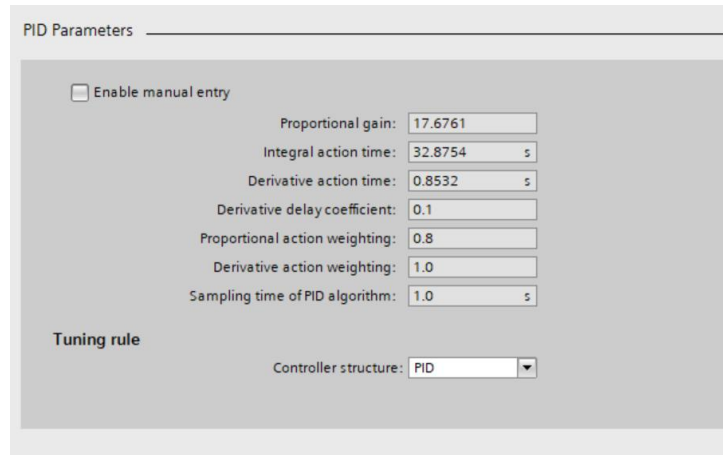


Los parámetros calculados en nuestra función fueron colocados en la programación de nuestro controlador, como se aprecia en la **Ilustración 76**. Sin embargo, se utilizó una de las herramientas que nos proporciona el bloque PID de Siemens, el consiste en un ajustador automático de los parámetros del controlador a través de datos experimentales.

Se puso en marcha el sistema para poder utilizar esta herramienta y determinar el ajuste de los parámetros k_p , k_i y k_d . Lo que se observó es que los parámetros del controlador en comparación con los que calculamos en el capítulo 2.3 cambiaron. Por ello se ocuparán los parámetros proporcionados por el ajuste automático, ya que la ventaja del ajuste automático del PLC es que puede dar un rendimiento más óptimo porque está trabajando con los datos experimentales, ayuda a reducir el tiempo para poner en marcha el sistema; además este ajuste automático puede variar y ayudarnos en la estabilidad del proceso. En la **Ilustración 77** se muestra el nuevo valor de los parámetros de nuestro controlador PID.

Ilustración 77

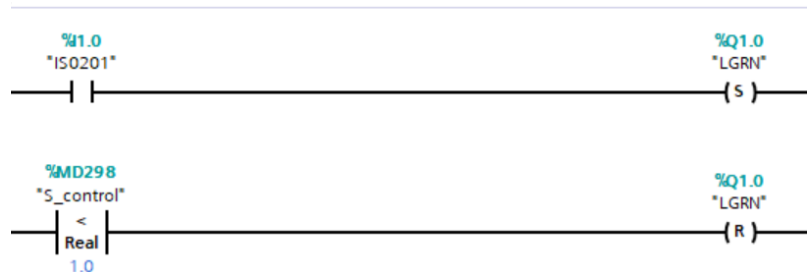
Parámetros actualizados del controlador PID



Con el fin de verificar la carga en CA-02-001, se instaló un indicador de corriente, denominado IS-02-001. La señal de este indicador se enviará a la entrada analógica I1.0. Utilizando el porcentaje del controlador, se implementó un controlador ON/OFF. Cuando el controlador se activa, se enciende un LED verde, y cuando el porcentaje alcanza el valor de 0% y la carga ya no se obtiene, el LED verde se apaga. La **Ilustración 78** muestra esta programación LED.

Ilustración 78

Programación de indicador led de CA-02-001

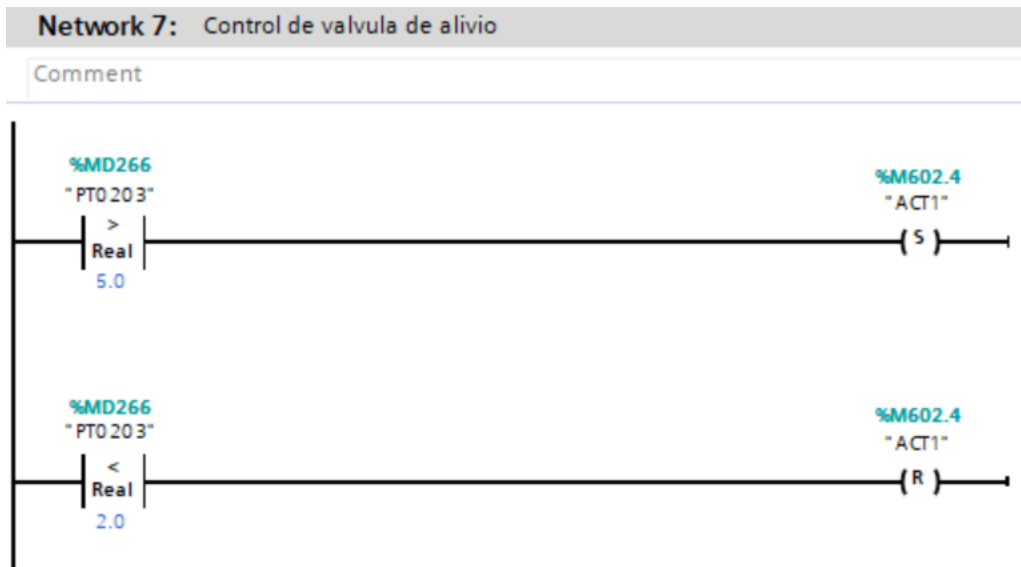


Además, a medida que CA-02-001 comienza a aumentar su temperatura, su presión también se incrementará. Para evitar la apertura de PSV-02-001 y garantizar la seguridad del sistema, se ha implementado un controlador para la válvula de alivio utilizando FV-02-002. Este controlador es activado mediante un botón llamado "ACT1" y opera en modo ON/OFF. Cuando la presión alcanza los 5 bar, el controlador abre la válvula FV-02-002. Por otro lado, cuando la presión

desciende a 2 bar, el controlador cierra la válvula. De esta manera, se asegura la protección de CA-02-001. En la **Ilustración 79** se observa la programación del control de presión.

Ilustración 79

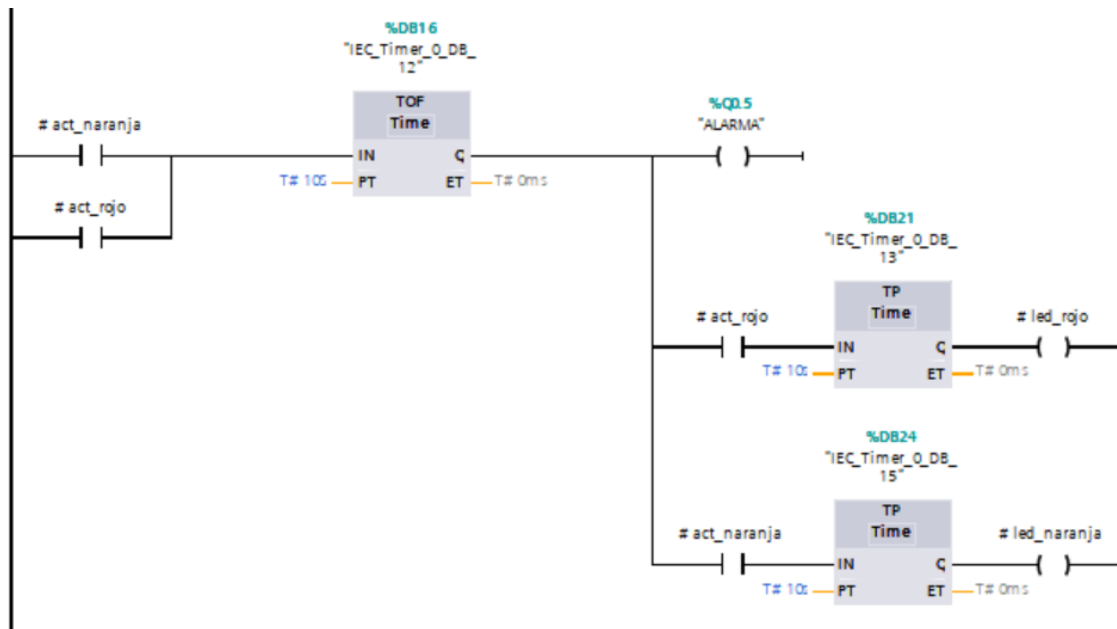
Control de la presión de CA-02-001



Las alarmas con los indicadores LED -cuya programación es observada en la **Ilustración 80**- están configuradas mediante una función que se adapta a la secuencia específica en la que se utiliza. En el caso del precalentado, se utiliza el LED naranja. Esta función toma como entradas las señales de los LED naranjas y rojos. Después de 10 segundos, se desactiva el zumbador y se reinicia la alarma para que, si es necesario activarla nuevamente, pueda hacerlo. De esta manera, se garantiza un funcionamiento adecuado de las alarmas.

Ilustración 80

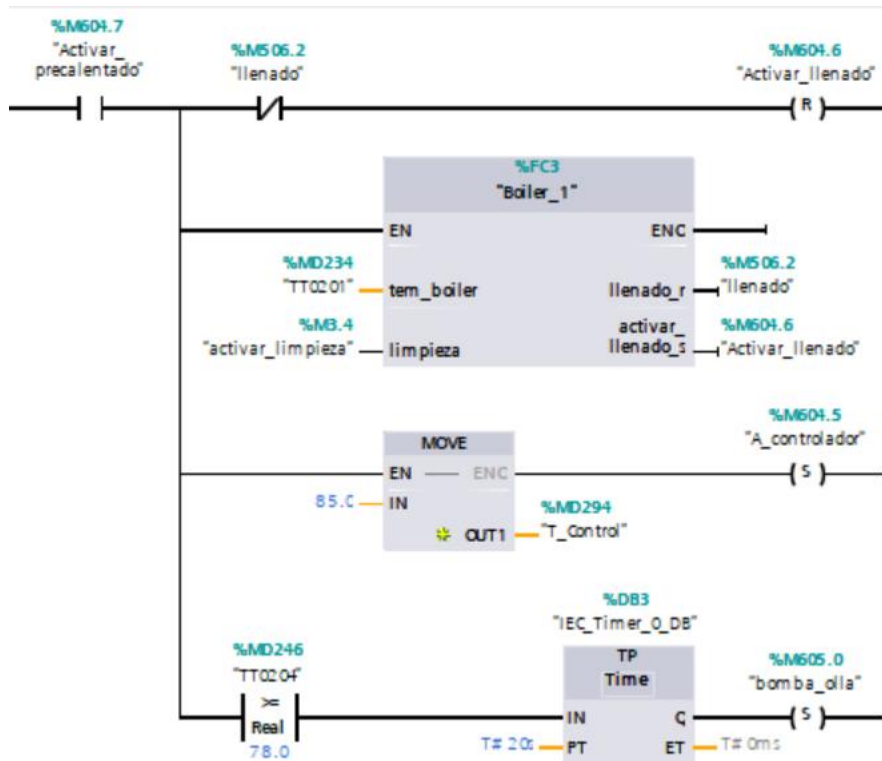
Programación de la función de las alarmas



Finalmente, una vez que se disponen de todas las herramientas necesarias, se procede a programar la secuencia de precalentamiento. Cuando se activa el precalentamiento, se desactiva el llenado del sistema, lo que resulta en el cierre de las válvulas FV-02-001 y FC-02-001. Además, se activa el controlador de CA-02-001 estableciendo el valor de "T_control" como el setpoint del controlador, fijado en 85°C. Una vez que la temperatura alcanza el valor adecuado, se activa la configuración de la función "Calentador eléctrico". Asimismo, cuando el indicador de temperatura TT-02-004 marca 78°C, se activa el botón "bomba olla". La programación de bloques se aprecia en la **Ilustración 81**.

Ilustración 81

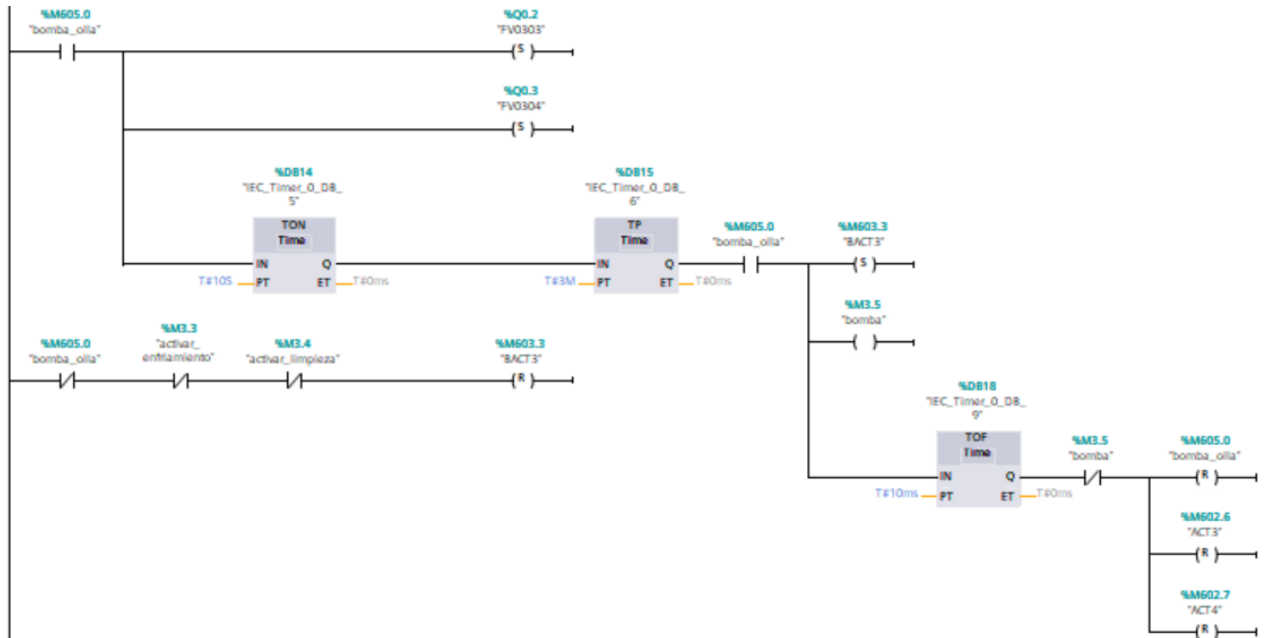
Programación del precalentado



El botón "bomba olla" tiene la función de abrir las válvulas FV-03-003 y FV-03-004. Después de 10 segundos, se activa BA-03-001 utilizando el botón "BACT3". Después de transcurridos 3 minutos, la bomba se desactiva y las válvulas se cierran. Además, se desactiva el botón "bomba olla" para permitir su uso nuevamente. En la **Ilustración 82** se observa la programación de la bomba.

Ilustración 82

Programación de bomba BA-03-001



4.6.2.1. Secuencia de precalentado en HMI

En la pantalla de precalentado en el HMI, se encuentra un botón que inicia el precalentado y está direccionado hacia "Activar precalentado". Además, se muestra en la pantalla la lectura de varios transmisores de temperatura. Estos incluyen TT-02-001, que mide la temperatura de CA-02-001; TT-02-002 y TT-02-003, que son los transmisores de temperatura de entrada y salida de IC-02-001, respectivamente; y TT-02-004, que es el transmisor de temperatura de la cerveza dentro de IC-02-001. La pantalla también contiene un bit de señal que se encenderá y apagará en función de la salida PWM utilizada para controlar la carga de CA-02-001.

Además, la pantalla incluirá botones que llevarán al proceso de precalentado y maceración, permitiendo el acceso rápido a las etapas correspondientes. La pantalla de precalentado se aprecia en la **Ilustración 83**.

Ilustración 83

Pantalla de precalentado en HMI

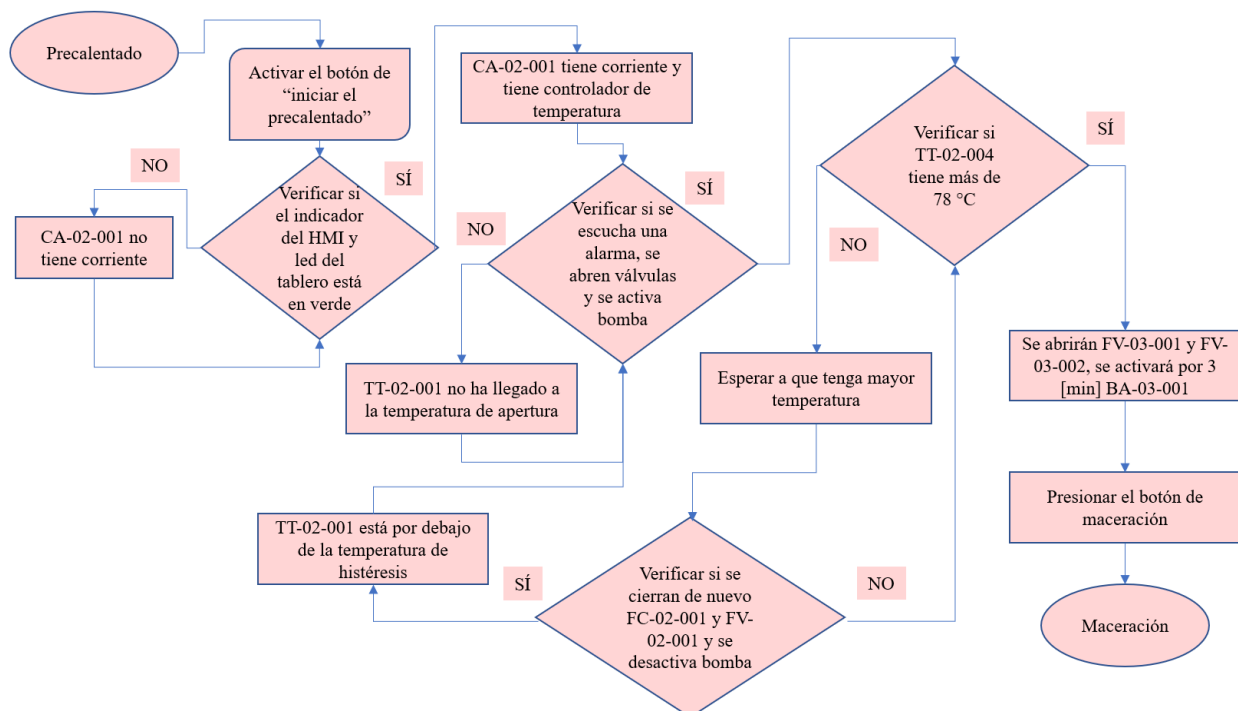


4.6.2.2. Manual de secuencia de precalentado

Las instrucciones que debe seguir el usuario para la secuencia de precalentado se aprecian en el diagrama de la **Ilustración 84**.

Ilustración 84

Diagrama de flujo de la secuencia de precalentado

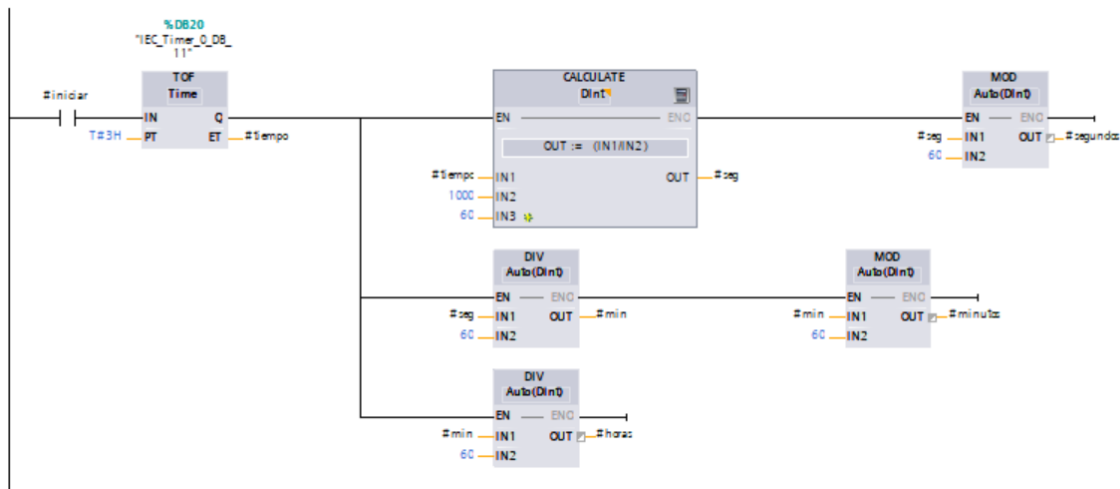


4.6.3. Programación secuencia de maceración

Cuando se activa la secuencia de maceración mediante el botón "Activar_maceración", se procede al cierre de las válvulas FV-02-001 y FC-02-001, desactivando los respectivos botones de control. Al iniciar la maceración, se programa una función de cronómetro utilizando un bloque de tiempo TOF. Este bloque inicia una secuencia desde el momento en que se envía el primer pulso. Luego, se asigna la variable de salida del bloque TOF a una constante temporal denominada "temp". Esto permite realizar operaciones para obtener los segundos, minutos y horas que serán utilizados en las siguientes etapas de la secuencia. La programación se encuentra en la **Ilustración 85**.

Ilustración 85

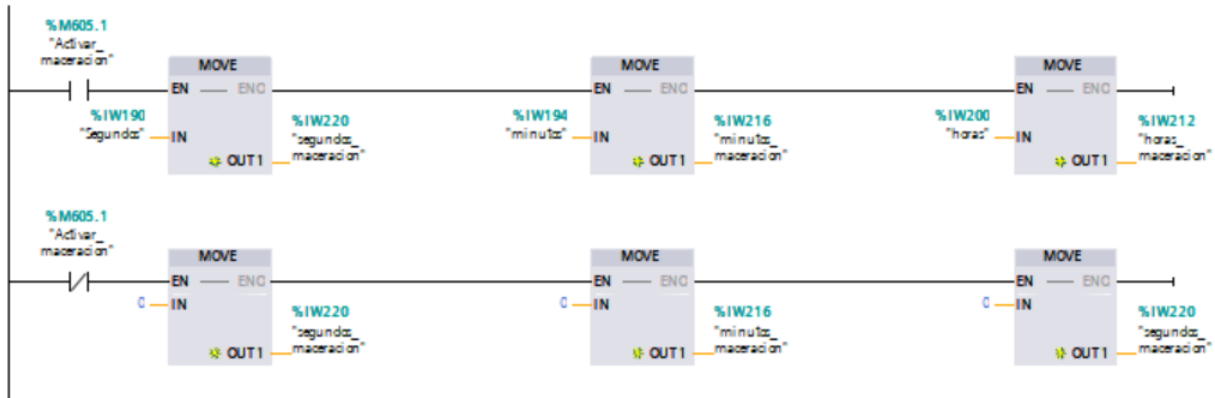
Programación de cronómetro



Durante el proceso de maceración, los valores de segundos, minutos y horas obtenidos anteriormente se transfieren al tag correspondiente de los tiempos de maceración utilizando la función MOVE. Esto permite registrar y utilizar dichos valores en el seguimiento y control de la duración de la maceración. Se aprecia la programación de los bloques de tiempo en la **Ilustración 86**.

Ilustración 86

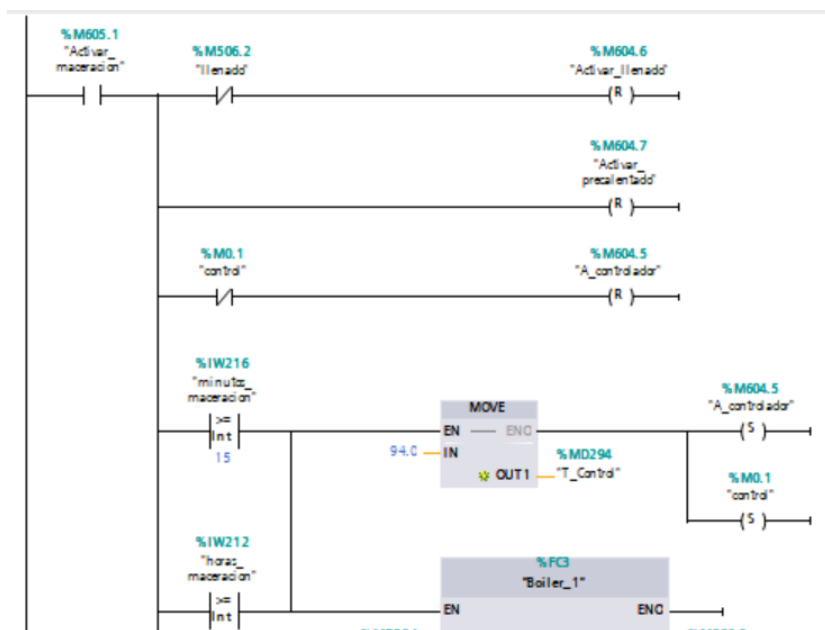
Inicialización de tiempo de maceración



Después de que el tiempo de maceración llegue a 15 min, se activará de nuevo la función calentador eléctrico -cuyo funcionamiento se muestra en el capítulo de precalentado- y el controlador de CA-02-001 tendrá un nuevo setpoint de 94°C. Hasta que llegue a una hora de maceración, se activará la función de alarma con el led rojo, indicando así al usuario que ha terminado la maceración; la programación de ésta se observa en la **Ilustración 87**.

Ilustración 87

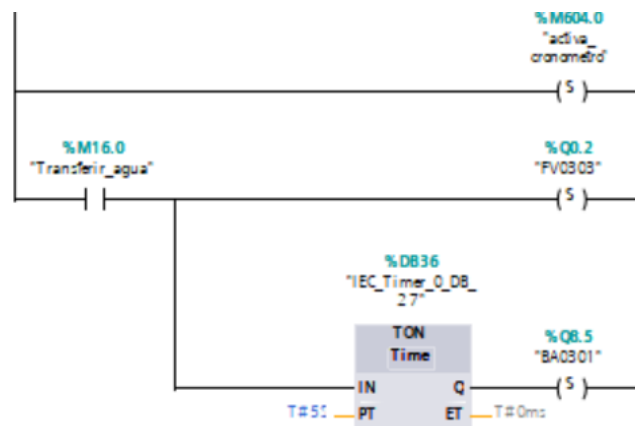
Programación de maceración



Posteriormente, es importante tener una cantidad de agua en IC-02-001. Finalmente, esta agua debe transferirse a una olla externa para ser utilizada más adelante en el lavado del mosto en la olla RA-03-001. Para llevar a cabo esta tarea, se ha creado un botón externo denominado "transferir agua". Al activarlo, se abre la válvula FV0303 y, después de 5 segundos, se activa BA-03.001 para iniciar la transferencia. La bomba continuará funcionando hasta que el usuario decida desactivarla; la **Ilustración 88** ejemplifica la programación de la transferencia de agua.

Ilustración 88

Programación de transferencia de agua para lavado de mosto



4.6.3.1. Secuencia de maceración en HMI

En la pantalla de maceración, se encuentran varios botones. Para empezar, hay un botón para activar la bomba BA-03-001, el cual abrirá las válvulas FV-03-003 y FV-03-004. Esto se realiza en caso de que sea necesario agregar más agua durante la etapa de precalentado. También se encuentra un botón que inicia el cronómetro de maceración.

Además, se muestran los valores de los transmisores de temperatura TT-02-001, TT-02-002, TT-02-003 y TT-02-004, los cuales brindan información sobre las temperaturas relevantes en el proceso de maceración.

Asimismo, está presente el botón "transferir agua" que, al ser activado, pone en funcionamiento la bomba BA-03-001 y abre la válvula FV-03-003 para transferir el agua; este proceso se detendrá cuando el usuario decida desactivarlo.

Por último, en la pantalla de maceración se encuentran los botones que nos retroceden a la pantalla de precalentado y el botón que nos dirige a la pantalla de hervor. Este conjunto de botones se aprecia en la **Ilustración 89**.

Ilustración 89

Pantalla de maceración en HMI

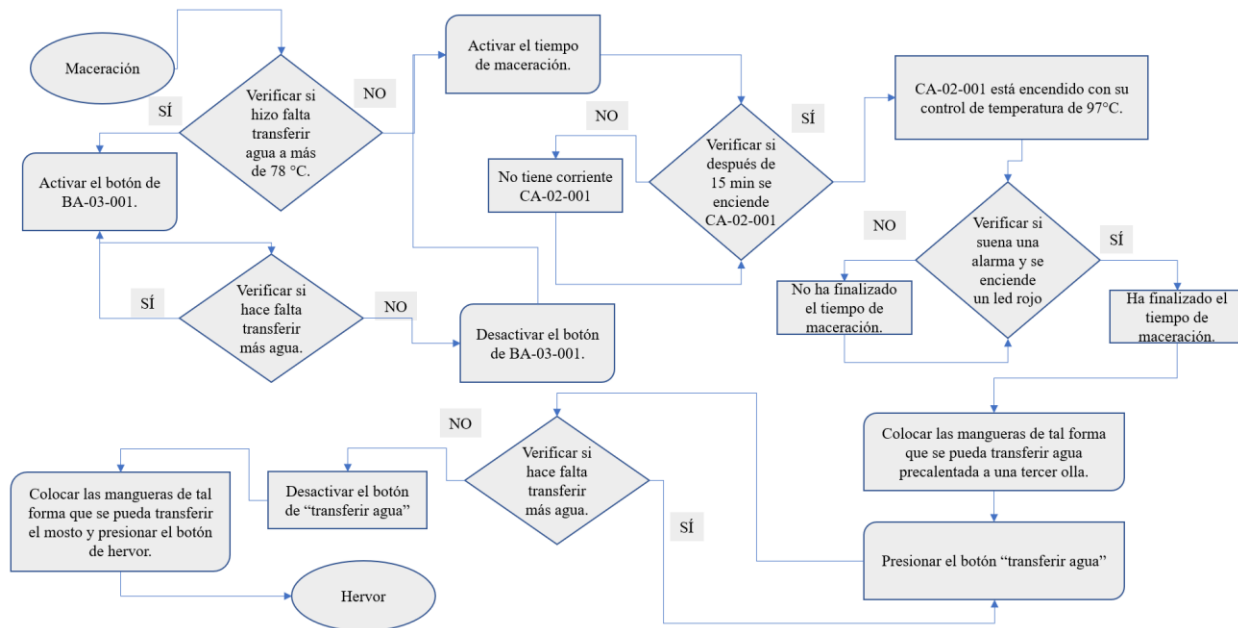


4.6.3.2. Manual de secuencia de maceración

Las acciones para la secuencia de maceración que el usuario debe de considerar se presentan en la **Ilustración 90**.

Ilustración 90

Diagrama de flujo de la secuencia de maceración



4.6.4. Programación secuencia de hervor

Una vez finalizada la etapa de maceración, se procede a activar la secuencia de hervor mediante el botón "transferir mosto". Al activarlo, se pone en funcionamiento el control de BA-03-001, FV-03-003 y FV-03-004, permitiendo el paso del mosto a la olla IC-02-001.

Una vez que el mosto ha sido transferido a la olla, se comienza a monitorear la temperatura utilizando el transmisor TT-02-004. Cuando la temperatura alcanza los 93°C, lo cual indica el inicio del hervor, se activa nuevamente la función del cronómetro. Se inicializan nuevos tags para registrar los valores de segundos, minutos y horas correspondientes al tiempo de hervor. Es importante destacar que, durante esta etapa, el controlador de CA-02-001 continúa operando y manteniendo estable la temperatura en 94°C. En la **Ilustración 92** se aprecian la transferencia del mosto.

Ilustración 91

Programación de transferencia de mosto

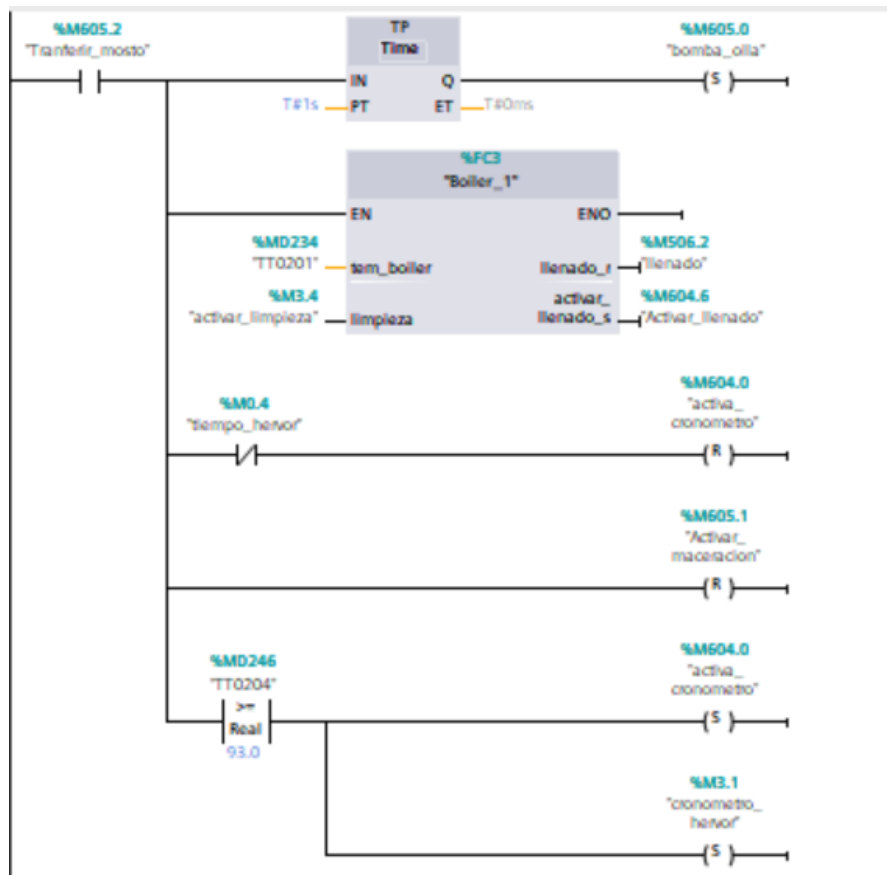
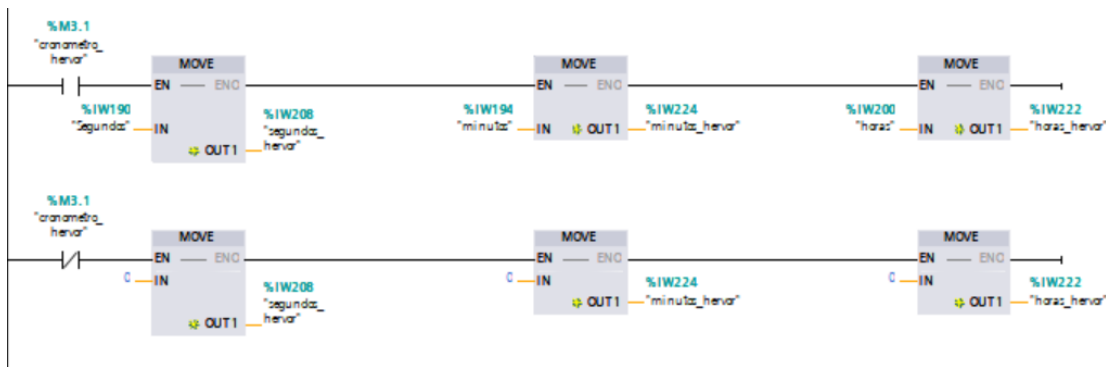


Ilustración 92

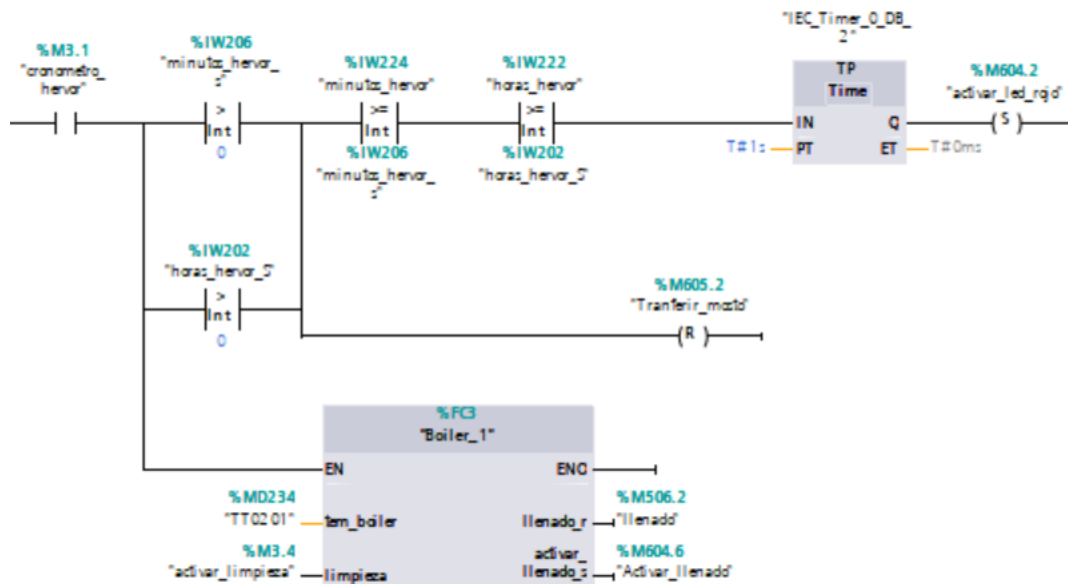
Inicialización de tiempo de hervor



Cuando se active el cronómetro de hervor, el usuario debe inicializar el tiempo de hervor de la olla; por lo tanto, hasta que el usuario no dé los parámetros, no reiniciará el botón de transferir mosto. Una vez que llegue a los parámetros que inicializó el usuario, mandará una alarma con el led rojo, haciendo alusión a que ha terminado el tiempo de hervor y puede iniciar el Whirlpool. La **Ilustración 93** explica esta programación.

Ilustración 93

Programación de cronómetro de hervor



Por último, se agrega un botón llamado "Activar Whirlpool" en la secuencia de hervor. Esta función reinicia el cronómetro y establece los valores de tiempo para las etiquetas del Whirlpool,

además de apagar a CA-02-001 y BA-02-001, dejando abiertas FV-02-001 y FC-02-001 para evitar que el sistema se presurice. Una vez que el cronómetro alcanza los 15 minutos, se activa una alarma con un LED rojo. En la **Ilustración 94** e **Ilustración 95** se observan estas secuencias de programación.

Ilustración 94

Programación de Whirlpool

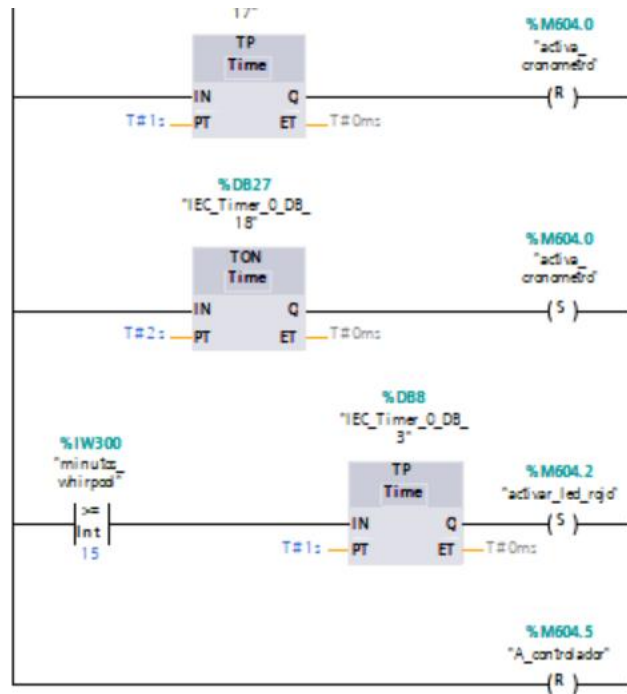
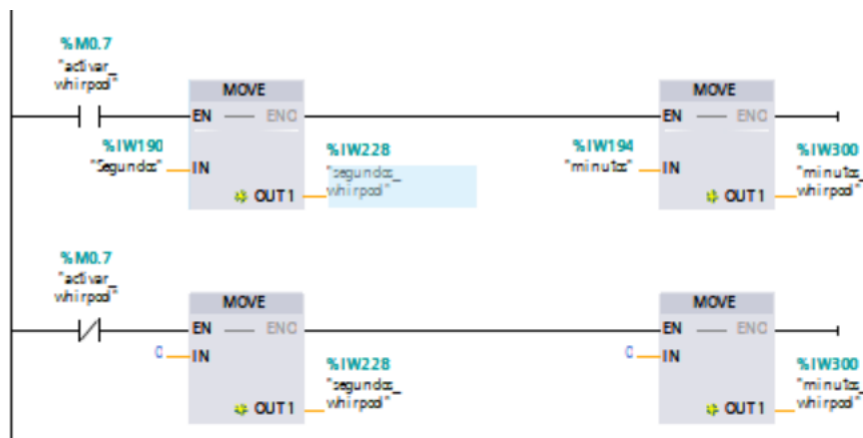


Ilustración 95

Inicialización de tiempo de Whirlpool

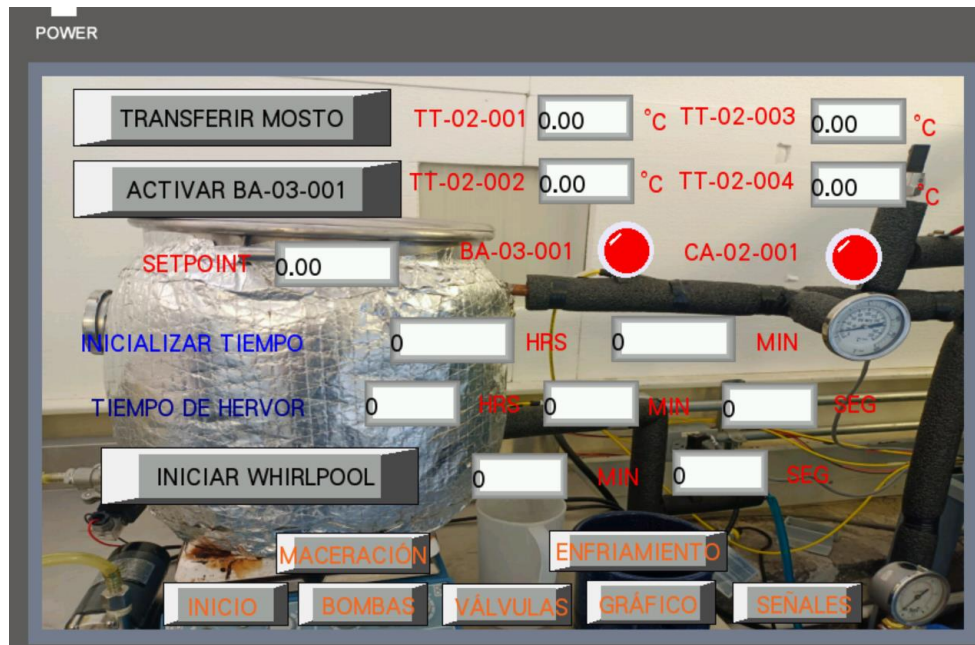


4.6.4.1. Secuencia de hervor en HMI

En la pantalla de hervor, se debe colocar un botón que indique la transferencia del mosto. En caso de necesitar más agua, se puede activar la bomba BA-03-001. Tanto la bomba BA-03-001 como CA-02-001 tienen un indicador de estado que muestra si están en funcionamiento. Además, se deben incluir editores de texto que permitan modificar las etiquetas de tiempo de inicio de hervor. El cronómetro de hervor es visible en la pantalla. Por último, se encuentra el botón de activación de Whirlpool, que también activará el cronómetro; en la **Ilustración 96** los botones de la pantalla de hervor son apreciables.

Ilustración 96

Pantalla de hervor

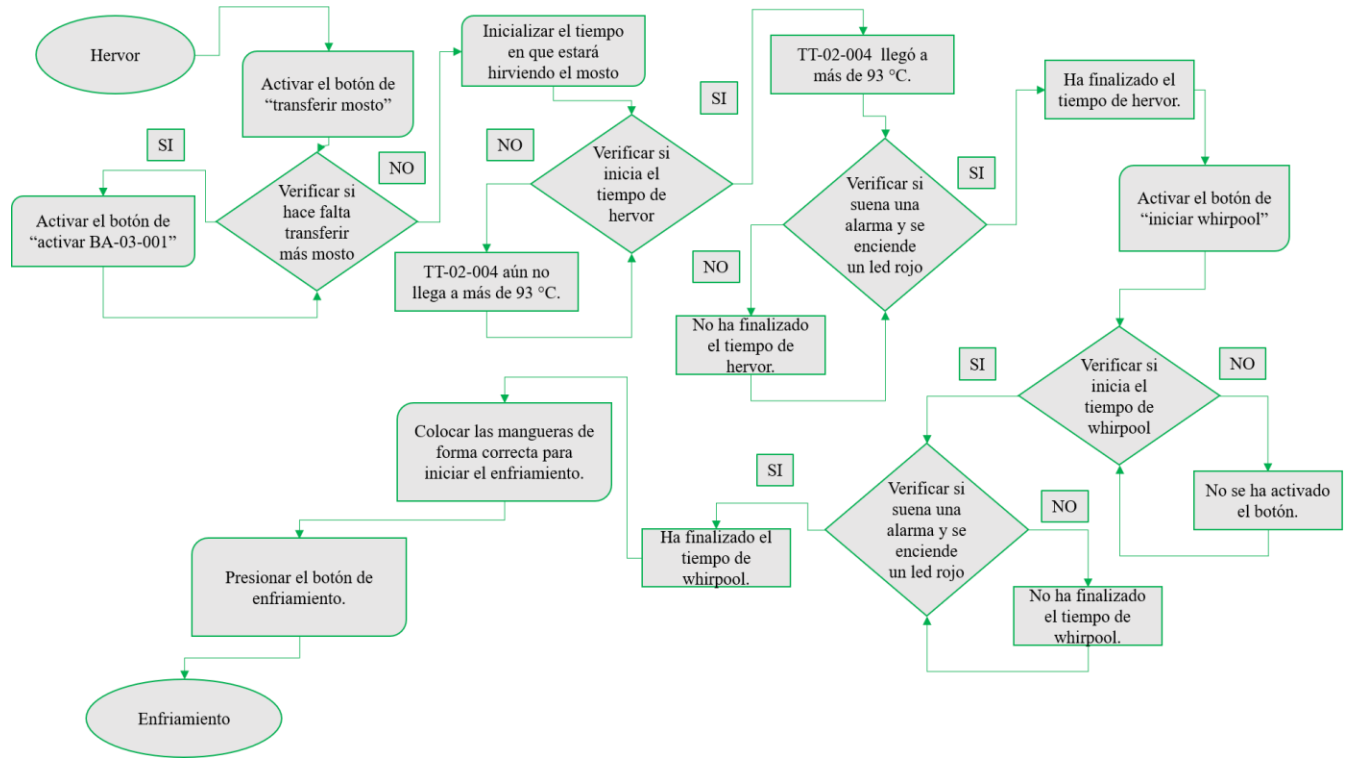


4.6.4.2. Manual de secuencia de hervor

El usuario puede seguir las instrucciones de la secuencia de hervor que se presentan en el diagrama de la **Ilustración 97**.

Ilustración 97

Diagrama de flujo de secuencia de hervor

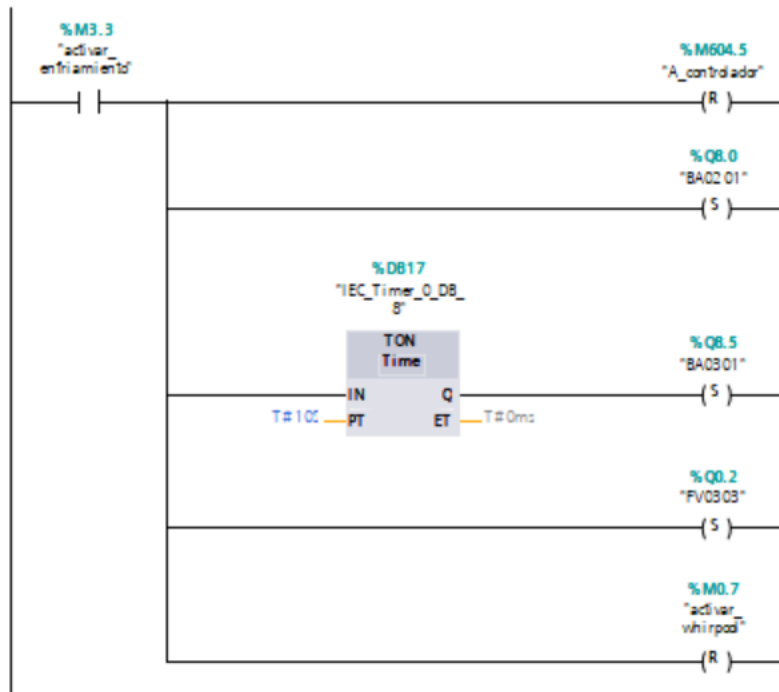


4.6.5. Programación secuencia de enfriamiento

Para activar el enfriamiento, se debe presionar el botón "Activar enfriamiento". En esta secuencia, se apaga CA-02-001, se activa la bomba BA-02-001 y se abre la válvula FV-03-003. Después de 10 segundos, se activa la bomba BA-03-001. Además, se desactiva el cronómetro del Whirlpool. Esta secuencia de enfriamiento continuará hasta que el usuario desactive el botón de enfriamiento. La **Ilustración 98** nos muestra la programación de la secuencia de enfriamiento.

Ilustración 98

Programación de secuencia de enfriamiento

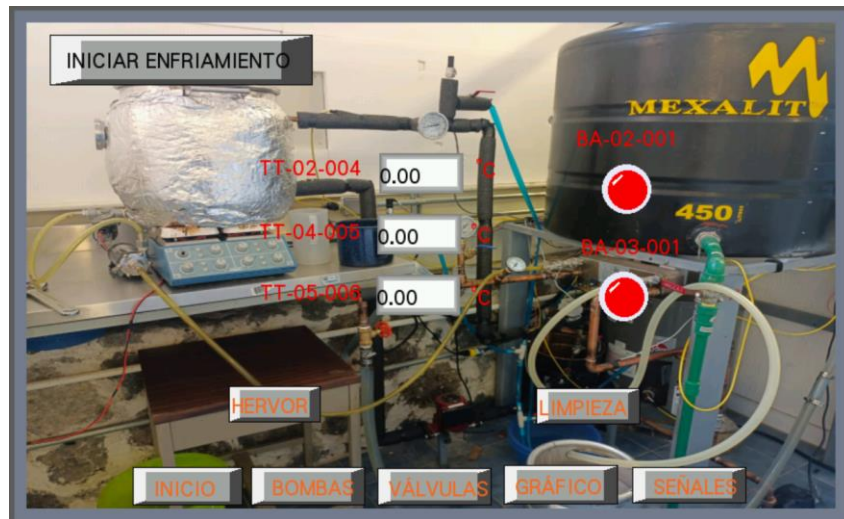


4.6.5.1. Secuencia de enfriamiento en HMI

En la pantalla de enfriamiento del HMI se requiere del botón que inicia el enfriamiento, se muestran los indicadores del funcionamiento de BA-02-001 y BA-03-001, y los transmisores de temperatura TT-02-004, TT-04-005 y TT-05-006. Se exhibe la pantalla de enfriamiento en la **Ilustración 99**.

Ilustración 99

Pantalla de enfriamiento en HMI

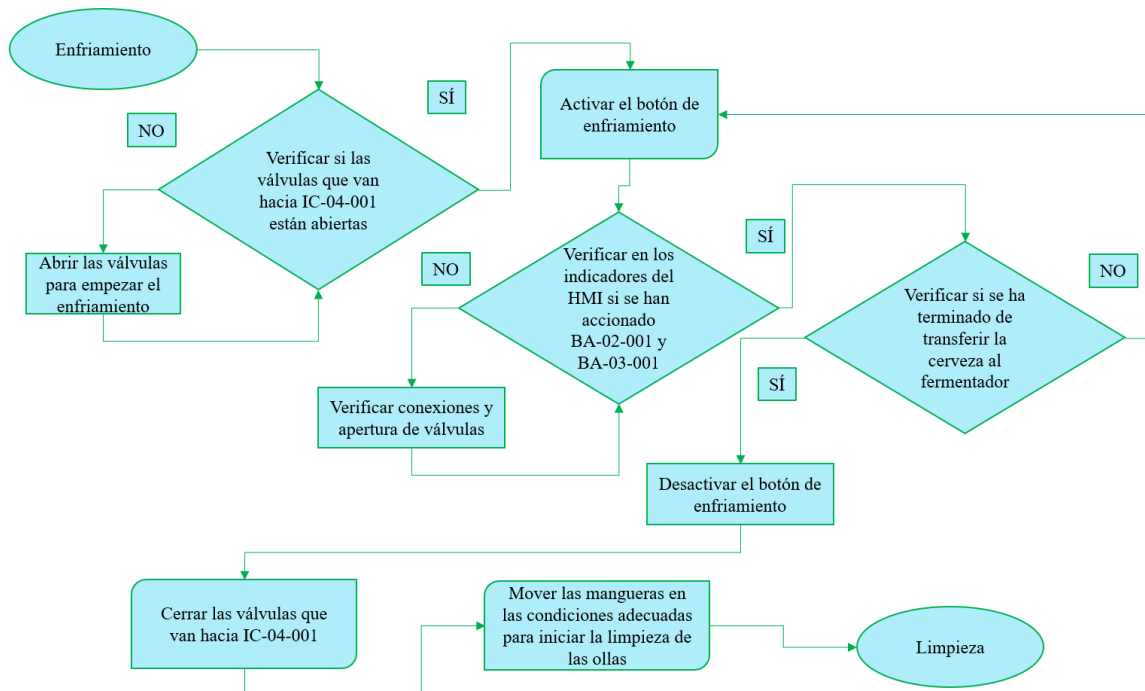


4.6.5.2. Manual de secuencia de enfriamiento

El diagrama de flujo de la secuencia de enfriamiento presente en la **Ilustración 100** indica las instrucciones que el usuario debe considerar.

Ilustración 100

Diagrama de flujo de secuencia de enfriamiento



4.6.6. Programación secuencia de limpieza

En esta secuencia, se utiliza un botón de "Activar limpieza". Además, se incluyen otros dos botones: uno para el uso de ácidos en la limpieza y otro para el enjuague. Al presionar el botón de ácidos, se activa el controlador de la bomba CA-02-001 a una temperatura de 65°C y se inicia la recirculación del calentador eléctrico, tal como se describe en el subcapítulo de precalentado. Cuando el sensor TT-02-004 alcanza los 50°C, se activan la bomba BA-03-001 y la válvula FV-03-003. Además, se inicializa el cronómetro y se establecen las etiquetas de tiempo para la limpieza. Cuando se cumplan los 15 minutos, se emitirá una alerta mediante un LED rojo. La **Ilustración 101** e **Ilustración 102** enseñan la programación llevada a cabo para la limpieza.

Ilustración 101

Controlador de CA-02-001 en limpieza

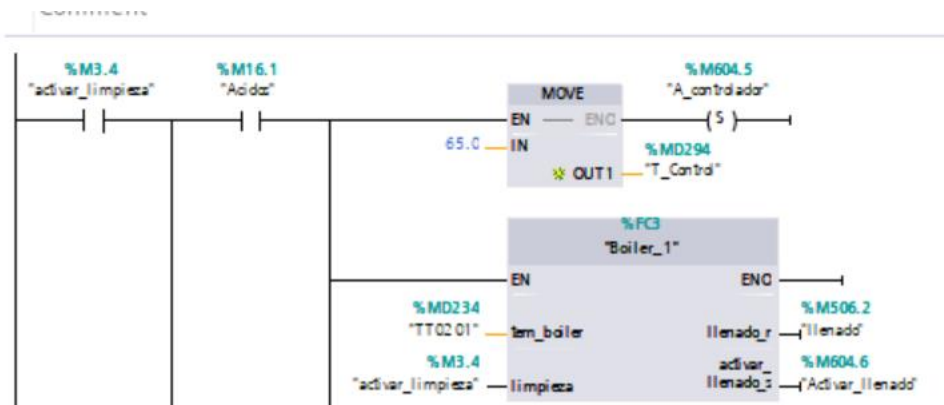
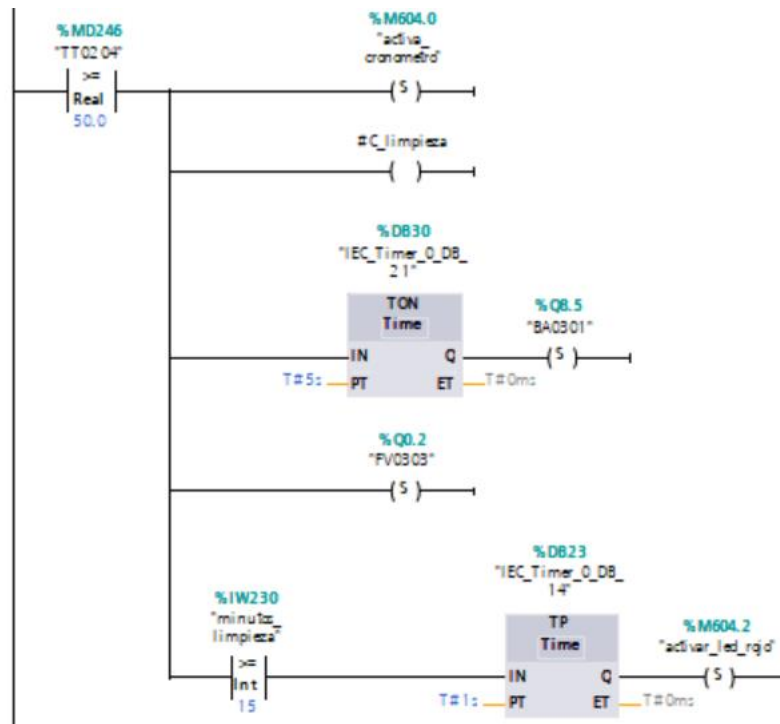


Ilustración 102

Programación de alarma de limpieza con ácidos



Con el botón de agua, se abre la válvula FV-03-003 y se activa la bomba BA-03-001 a temperatura ambiente durante 15 minutos. Una vez transcurrido ese tiempo, se activa una alarma con un LED rojo para indicar que ha finalizado el proceso. La **Ilustración 103** e **Ilustración 104** presentan otras programaciones para la limpieza.

Ilustración 103

Programación de alarma de limpieza con agua

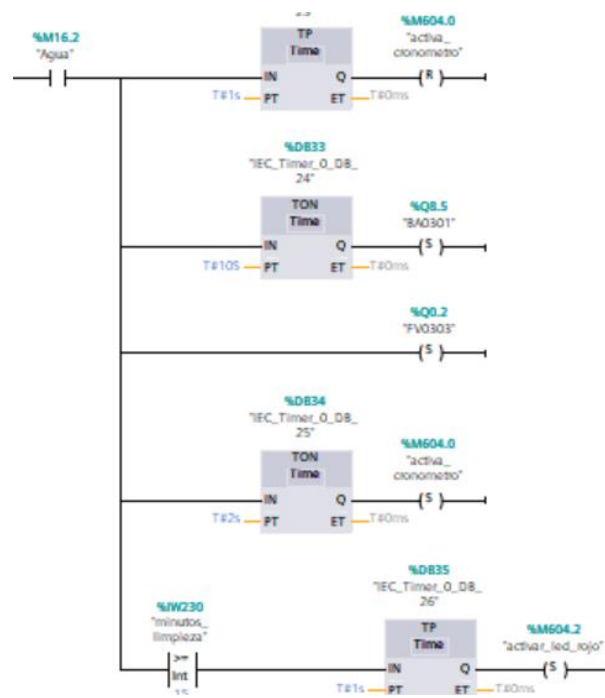
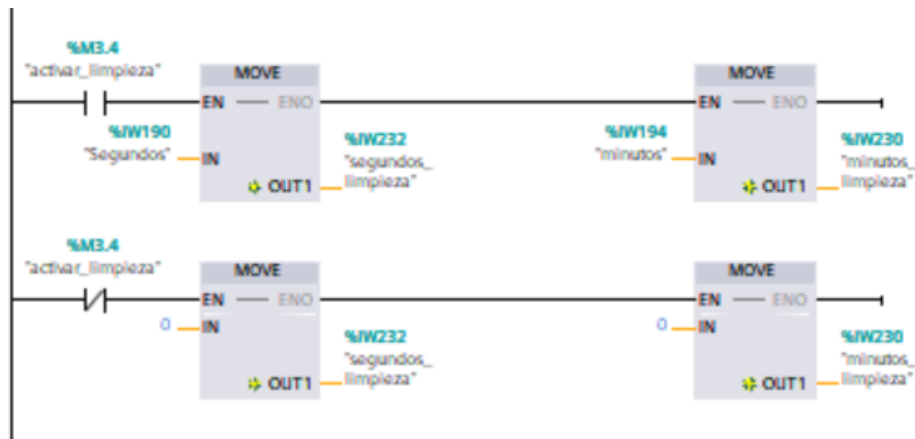


Ilustración 104

Inicialización de tiempo de limpieza



4.6.6.1. Secuencia de limpieza en HMI

En la pantalla de limpieza del HMI, se tienen los botones de “iniciar limpieza”, “ácidos” y “agua”. Además de tener los transmisores de temperatura TT-02-001, TT-02-002, TT-02-003 y TT-02-004, se tiene un bit de estado para verificar el funcionamiento de CA-02-001 y de BA-03-

001; asimismo, se muestra el cronómetro del tiempo en que se usan estos botones. La **Ilustración 105** muestra estos botones.

Ilustración 105

Pantalla de secuencia de limpieza

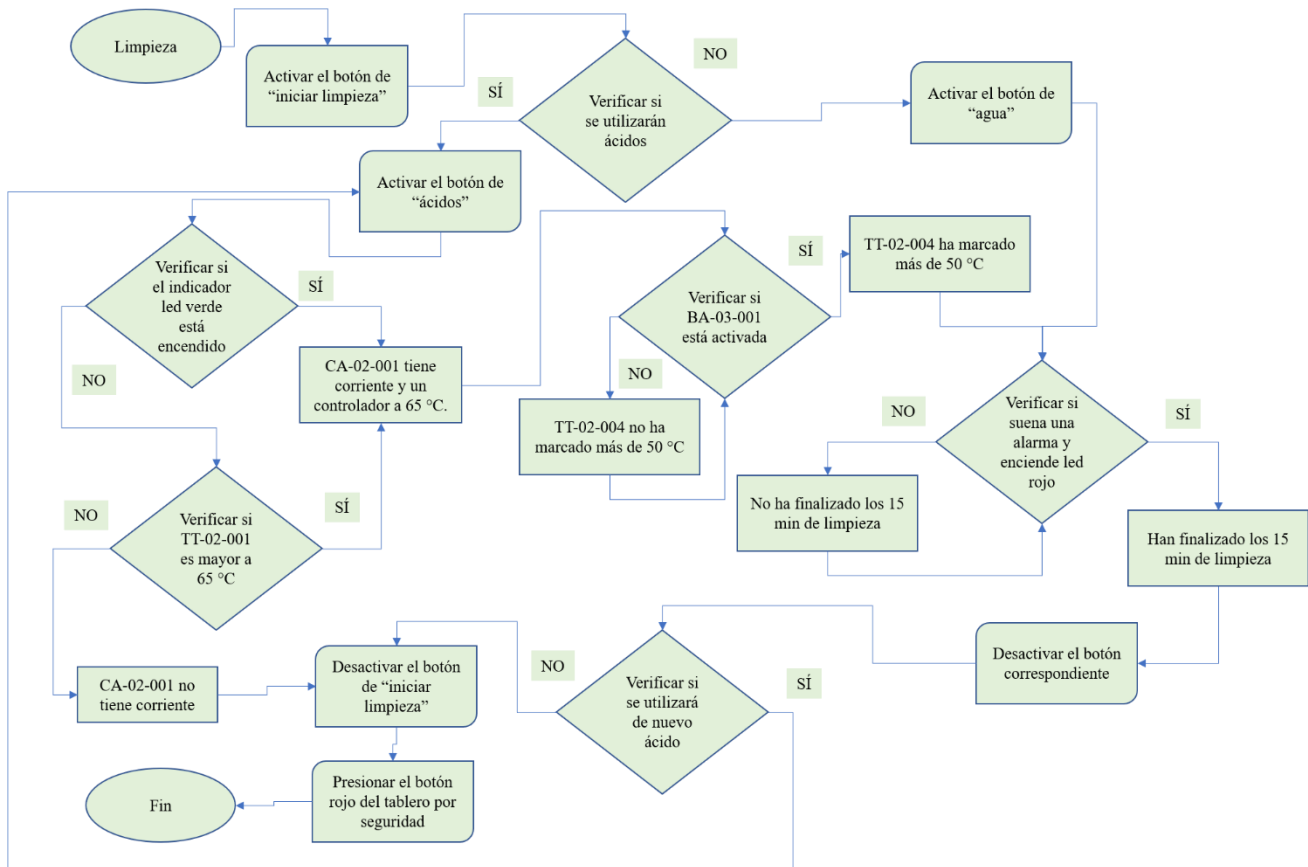


4.6.6.2. Manual de secuencia de limpieza

Se guía al usuario a través del diagrama de flujo de secuencia de limpieza, como se expone en la **Ilustración 106**.

Ilustración 106

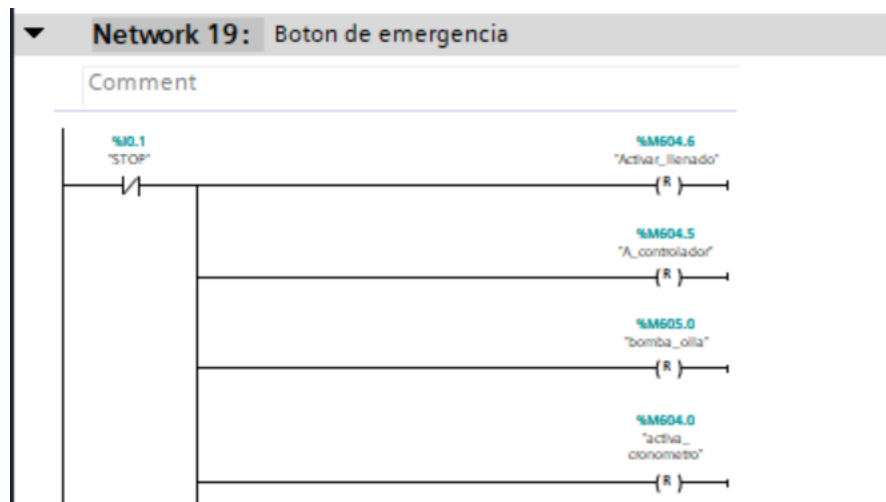
Diagrama de flujo de secuencia de limpieza



Al finalizar la programación de las secuencias, es imprescindible contar con un botón de emergencia en caso de que se produzca alguna anomalía durante el proceso. Para esto, se incorpora un botón denominado "Detener" que tiene la función de reiniciar todos los botones de las secuencias, lo cual resulta en la interrupción inmediata del proceso en curso. La programación de este botón aparece en la **Ilustración 107**.

Ilustración 107

Programación de botón de emergencia



4.7. Resultados

Una vez concluida la programación del tablero de control y con el sistema completamente ensamblado, incluyendo todos sus instrumentos de monitoreo, se procedió a poner en marcha el sistema y llevar a cabo pruebas para evaluar su funcionamiento. Como parte de este proceso, se elaboró una tabla que detalla las distintas secuencias implementadas y los resultados obtenidos de cada una de ellas.

Tabla 8

Resultados obtenidos

Etapas del proceso	Resultados obtenidos
Secuencia de llenado	<ul style="list-style-type: none"> • Se llevó a cabo el monitoreo de fugas en el sistema. • Se implementó la apertura automática y manual de válvulas. • El llenado del sistema se realizó de manera controlada. • Se diseñó una pantalla de HMI adecuada para facilitar la interacción con el usuario. • Los indicadores del HMI fueron verificados para asegurar que estuvieran funcionando correctamente.

Etapas del proceso	Resultados obtenidos
Secuencia de precalentamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Se realizó la verificación del funcionamiento del indicador de corriente y LED. • La alarma de recirculación del recurso geotérmico fue puesta a prueba y se encontró en funcionamiento. • Se verificó que la pantalla de precalentamiento del HMI muestra las señales correctas de los sensores de temperatura. • El controlador PID de la temperatura del calentador eléctrico funciono de acuerdo con lo esperado. • Se comprobó que las válvulas se abren y la bomba se activa cuando se alcanza la temperatura de 78 °C.
Secuencia de maceración	<ul style="list-style-type: none"> • Se verificó el correcto funcionamiento del botón que enciende la bomba en caso de requerir más agua, el cual se activa y desactiva adecuadamente. • El proceso de transferir agua precalentada a una tercera olla se ejecutó de manera óptima. • El cronómetro de maceración funcionó correctamente. • La alarma que indica el fin del tiempo de maceración se ejecutó como se esperaba y emitió la señal correspondiente. • El cambio de mangueras para avanzar a las siguientes secuencias se realizó de forma sencilla y práctica. • El calentador eléctrico se activó a los 15 minutos y se ajustó a un nuevo setpoint de 97°C para el proceso. • El controlador ON/OFF de la válvula de alivio se probó y su funcionamiento fue el esperado.
Secuencia de hervor	<ul style="list-style-type: none"> • Se realizó la apertura de las válvulas y la activación de la bomba para transferir el mosto en el sistema. • El botón de emergencia se encontró en óptimas condiciones, permitiendo la activación y desactivación del proceso de transferencia del mosto en caso de ser necesario.

Etapas del proceso	Resultados obtenidos
	<ul style="list-style-type: none"> • Se verificó que el agua alcance el punto de ebullición en el sistema. • Se logró alcanzar y mantener la temperatura de 97°C en el sistema gracias a la adecuada funcionalidad del controlador PID. • Se verificó que el cronómetro iniciara correctamente al alcanzar la temperatura de ebullición. • La alarma se activó de manera efectiva cuando el cronómetro llegó al tiempo de ebullición establecido por el usuario. • Se constató el correcto funcionamiento del cronómetro de Whirlpool y la alarma se activó de manera adecuada cuando alcanzó los 15 minutos.
Secuencia de enfriamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Se constató que la manipulación de las mangueras para conectar la línea correcta desde la olla de hervor hacia el fermentador fue realizada de manera adecuada. • Se verificó que el accionamiento de las bombas ha sido probado y su funcionamiento es el esperado. • Se comprobó que el proceso de enfriamiento de la cerveza se lleva a cabo de manera correcta, alcanzando la temperatura deseada para dar inicio a la fermentación.
Secuencia de limpieza	<ul style="list-style-type: none"> • Se corroboró que la activación del botón de los ácidos funciona de manera correcta. • Se verificó que el calentador eléctrico se activa con el controlador de temperatura a 65 °C y se mantiene a esa temperatura gracias al control PID. • Se constató que el cronómetro de limpieza con ácidos y su alarma funcionan de forma correcta.

Etapas del proceso	Resultados obtenidos
	<ul style="list-style-type: none"> • Se confirmó que el botón de limpieza con agua marcha correctamente, activando el cronómetro y activando la alarma al finalizar el tiempo. • Se corroboró que el botón de paro de emergencia cumple su función adecuadamente, deteniendo y apagando los equipos cuando es accionado.

4.7.1. Resultados de documentos de diseño e ingeniería

En los documentos de detalle se realizó el diagrama eléctrico, lo que permitió ensamblar el tablero de control y garantizar la protección adecuada de los equipos.

A continuación, se muestra una tabla en la cual se muestran los documentos generados y lo más relevante de cada uno de ellos:

Tabla 9

Tabla de resultados obtenidos de los documentos de diseño e ingeniería.

Documento	Resultados
Diagrama de flujo y de proceso	Este documento proporcionó una comprensión clara del comportamiento del sistema, la configuración de los equipos que lo conforman, la interconexión entre ellos, así como los nombres o identificadores asignados a cada equipo. Además, se detallaron las áreas de los procesos involucrados y los tipos de flujos que se presentarían en cada una de ellas.
Balance de masa y energía	Con base en este documento, se enumeraron los equipos requeridos para el monitoreo y control de la cervecería geotérmica. Asimismo, se anticiparon los resultados obtenidos al poner el sistema en marcha.
Diagrama de tuberías e instrumentación	Este documento proporcionó una estructura detallada de las tuberías, incluyendo el material y las dimensiones requeridas. También permitió determinar la cantidad de

Documento	Resultados
	instrumentos necesarios y su ubicación adecuada para la instalación.
Lista de instrumentos	Este documento proporcionó el total de los instrumentos, incluyendo las etiquetas que deben ser colocadas tanto durante la programación del PLC así como para su identificación en el proceso.
Lista de señales	Gracias a este documento, se obtuvo información relevante sobre las señales analógicas y digitales, además de las entradas y salidas necesarias para la programación. También se determinaron los rangos adecuados que deben utilizarse para colocarse en la programación.
Lista de dispositivos de control	Este documento brindó la información necesaria para tener en cuenta los dispositivos que formarían parte del sistema de control, incluyendo los puntos de operación en los que debían ser configurados y la formación de nuestros lazos de control.
Filosofía de operación	Con base en este documento, se comprendió el funcionamiento del sistema, lo que permitió la creación de diagramas de secuencias y la generación del documento de filosofía de control.
Especificaciones de instrumentación	En este documento, se brindó la información necesaria sobre las características y especificaciones que debían tener los instrumentos utilizados en el sistema. Esto permitió el diseño de las hojas de datos y facilitó el proceso de adquisición de los equipos necesarios.
Diagrama eléctrico	La información presentada permitió determinar la ubicación de cada componente en el tablero y realizar el análisis de cargas indispensable para colocar las protecciones adecuadas en los equipos.

Documento	Resultados
Análisis de cargas	Gracias a la información proporcionada en este documento, se realizó la selección adecuada de las protecciones necesarias para los equipos eléctricos.
Filosofía de control	Este documento fue elaborado con base en todas las herramientas previamente obtenidas, lo que permitió generar los diagramas necesarios para la programación del PLC. Gracias a esta estructura, se logró establecer un orden adecuado para las secuencias y facilitó una programación más fluida y eficiente.

En un principio, los documentos de ingeniería se basaban en un sistema de tres ollas y varias bombas. Conforme se puso en marcha el sistema, se llegó a la conclusión de que resultaba más eficiente utilizar una sola bomba para las tres. En este nuevo sistema, se realizaron los cambios de mangueras correspondientes para adaptarse a la configuración de las tres ollas, pero utilizando una sola bomba. A pesar de esta modificación, el proceso en sí permanece prácticamente igual, con solo una o dos diferencias menores al finalizar la instalación del sistema. El sistema de tres ollas se aprecia en la **Ilustración 108**.

Ilustración 108

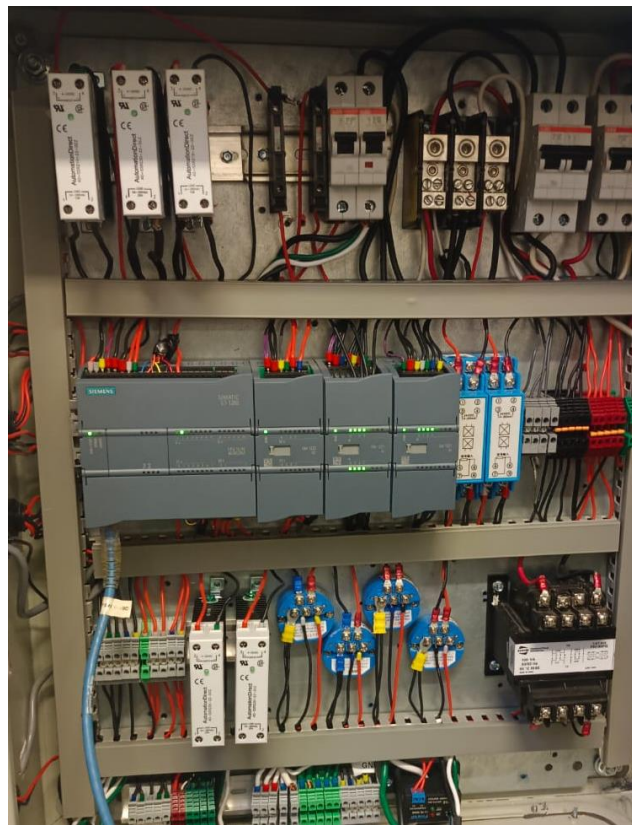
Sistema de 3 ollas con una sola bomba



En el diseño del tablero de control, se logró instalar todos los componentes necesarios para llevar a cabo el proceso. El espacio disponible en el tablero fue adecuado para acomodar los elementos requeridos. Además, se colocaron filtros de ventilación con el fin de evitar el sobrecalentamiento de los equipos durante la ejecución de los procesos. Estos filtros contribuyen a mantener una temperatura óptima y garantizar el correcto funcionamiento de los equipos involucrados. En la **Ilustración 109** se aprecia el tablero.

Ilustración 109

Ensamble del tablero de control de la PCG



4.7.2. Resultados de llenado de sistema

Este paso de la programación permitió la apertura de las válvulas necesarias para llevar a cabo la secuencia. Se utilizó un bit para indicar cuándo se activa el proceso de llenado. Además, en caso de ser necesario, se encendió la bomba BA-02-001 para agilizar el llenado del sistema. La **Ilustración 110** nos muestra el funcionamiento de la pantalla del HMI de la secuencia de llenado.

Ilustración 110

Resultados de la secuencia de llenado



4.7.3. Resultados de precalentado

En la pantalla de precalentamiento se observó que se encuentran las señales necesarias para el funcionamiento del sistema. Cuando se inició el proceso de precalentamiento, se activó CA-02-001 junto con su controlador correspondiente e indicador LED. Esta acción garantizó que el sistema de precalentamiento estuviera operando y funcionara de manera adecuada. Un ejemplo de la operación se observa en la **Ilustración 111**.

Ilustración 111

Funcionamiento de pantalla de precalentado



Una vez que CA-02-001 alcanzó una temperatura de 74°C, se activaron las válvulas necesarias para iniciar la circulación del líquido. Se verificó que el tiempo necesario para que CA-02-001

alcanzara la temperatura deseada fuera de 1 hora y 13 minutos, lo cual permitió dar inicio al proceso. A medida que el agua comenzó a circular a través de la **chaqueta**¹³ de la olla IC-02-001, se observó un aumento gradual de la temperatura. Cuando el agua alcanzó los 78°C, se activaron las válvulas FV-03-003 y FV-03-004 para transferir el agua a la olla RA-03-001. El funcionamiento del precalentamiento se aprecia en la **Ilustración 112**.

Ilustración 112

Funcionamiento del precalentamiento



Con la finalización de este paso, se completó la secuencia de precalentamiento, lo que indicó que el sistema estaba listo para llevar a cabo el proceso de maceración.

4.7.4. Resultados de maceración

Durante el proceso de maceración, se inició el cronómetro para registrar el tiempo transcurrido durante el proceso. Se estableció para CA-02-001 un nuevo setpoint a 94°C, y el indicador se mantuvo en un estado óptimo. Una vez que se cumplió la hora de maceración programada, se activó una alarma correspondiente que alertara al usuario. Esto indicó que era momento de manipular las mangueras para transferir el agua a una tercera olla, según fuera necesario. El funcionamiento de la pantalla de maceración se observa en la **Ilustración 113**.

¹³ Es una estructura adicional que rodea el recipiente principal y está diseñada para realizar la transferencia de calor en procesos industriales.

Ilustración 113

Funcionamiento de pantalla de maceración



En la etapa de transferencia, al activar el botón correspondiente, logró transferir el agua a la tercera olla según lo indicado en la filosofía de control previamente establecida. Esto confirmó que la secuencia de maceración se hubo completado tal y como se había planteado. A partir de este punto, se procedió a la secuencia de hervor. La transferencia de agua se aprecia en la **Ilustración 114**.

Ilustración 114

Funcionamiento de transferencia de agua a una tercera olla



4.7.5. Resultados de hervor

Para la secuencia de hervor se había establecido que se utilizaría un botón para transferir el mosto desde RA-03-001 a IC-02-001. Al ser presionado por el usuario, se llevó a cabo esta secuencia. La **Ilustración 115** ejemplifica cómo se transfirió el mosto.

Ilustración 115

Transferencia de mosto



Cuando se terminó la secuencia, comenzó a elevarse la temperatura para que iniciara el hervor. Una vez que el indicador marcó la temperatura de 93°C, se inició el cronómetro y, cuando éste llegó al tiempo que había establecido el usuario, se encendió la alarma con el led rojo, lo que puede observarse en la **Ilustración 116**.

Ilustración 116

Alarma de hervor



Una vez que finalizó el tiempo, se activó el botón de Whirlpool -está presente en la *Ilustración 117*- para que éste, después de 15 minutos, mandara una alarma para que se siguiera el proceso de enfriamiento. Se observó también que las válvulas se mantuvieran abiertas y CA-02-001 y BA-03-001 se apagaron.

Ilustración 117

Alarma de Whirlpool

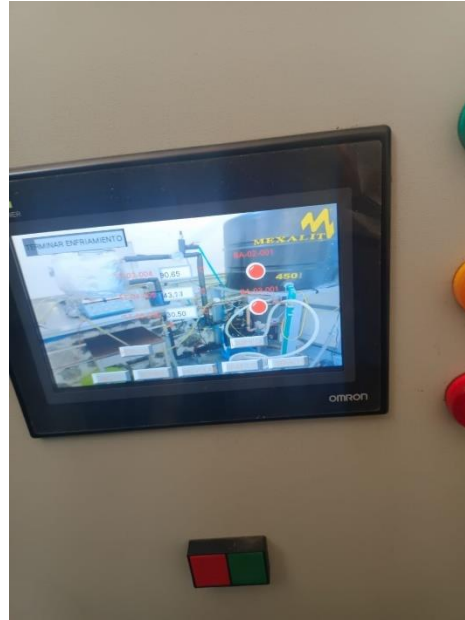


4.7.6. Resultados de enfriamiento

Para concluir el proceso de elaboración de la cerveza artesanal, se llevó a cabo la etapa de enfriamiento. Durante esta fase, se realizó la transferencia del líquido desde la olla IC-02-001 hacia el fermentador. Para ello, se activó la opción de enfriamiento en la pantalla y se puso en funcionamiento la bomba BA-02-001. Con esta acción, se dio por finalizado el proceso de elaboración de la cerveza, y se procedió a realizar un reposo de dos semanas para completar el ciclo de fermentación adecuado. La *Ilustración 118* presenta la pantalla de enfriamiento.

Ilustración 118

Pantalla de enfriamiento en funcionamiento



4.7.7. Resultados de limpieza

Utilizando el controlador de temperatura de CA-02-001, se ejecutó el proceso de limpieza de las ollas y del intercambiador de calor. Al activar los botones correspondientes, se inició el cronómetro y se programó una alarma para marcar el final de la limpieza. Durante este proceso, se garantizó una limpieza efectiva y controlada. El buen funcionamiento de la pantalla de limpieza se expone en la **Ilustración 119**.

Ilustración 119

Funcionamiento de la pantalla de limpieza



4.7.8. Costos de instalación de la instrumentación y control del sistema

Se hizo el análisis de costos que se requirieron para cada uno de los equipos de control e instrumentación que se utilizaron en la PCG.

Tabla 10

BOM de PCG

COMPONENTE	MARCA	MODELO	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL	ENVÍO	PRECIO CON IVA INCLUIDO	PRECIO EN USD
Termomagnético	ABB	S203-C50	Pieza	1	\$873.50	\$698.00	\$20.00	\$832.88	\$ 46.27
Termomagnético	ABB	S202-C20	Pieza	1	\$182.94	\$182.94	\$20.00	\$235.41	\$13.08
Termomagnético	ABB	S201-C2	Pieza	1	\$98.00	\$98.00	\$20.00	\$136.88	\$7.60
Termomagnético	ABB	S201-C10	Pieza	1	\$110.00	\$110.00	\$20.00	\$150.80	\$8.38
Bloque de distribución de cargas	MARATHON SPECIAL PRODUCTS	3845-1323580-ND	Pieza	1	\$1,024.19	\$1,024.19	\$816.10	\$2,134.74	\$118.60
Portafusibles	EARU ELECTRIC	UK-5-HESI	Pieza	1	\$271.57	\$271.57	\$335.28	\$703.95	\$39.11
Fusibles	STEREN	FEUR 3	Pieza	4	\$3.45	\$13.80	\$5.00	\$21.81	\$1.21
SSR	AUTOMATION DIRECT	AD-SSR210-22-DCZ	Pieza	4	\$828.00	\$3,312.00	\$335.00	\$4,230.52	\$235.03
SSR	AUTOMATION DIRECT	AD-SSR230-22-DCR	Pieza	1	\$936.00	\$936.00	\$0.00	\$1,085.76	\$60.32
Transductor	SOWAKAM	PT100-0-150	Pieza	6	\$184.21	\$1,105.26	\$375.98	\$1,718.24	\$95.46
Bloque de terminales	DIN	UK-2.5B	Pieza	6	\$19.28	\$115.68	\$127.41	\$281.98	\$15.67
Interruptor de Corriente	FEARLIE	M3056	Pieza	1	\$92.89	\$92.89	\$87.39	\$209.12	\$11.62
Transformador	AUTOMATION DIRECT	PH100PG	Pieza	1	\$1,404.00	\$1,404.00	\$335.00	\$2,017.24	\$112.07
Indicador led	WYTINO	AC/DC 24V	Pieza	1	\$215.00	\$215.00	\$110.00	\$377.00	\$20.94
Piloto zumbador	W ELECTRONICS	Ad16-22sm	Pieza	1	\$159.00	\$159.00	\$89.00	\$287.68	\$15.98
Cable rojo	BNTECHGO	ROJO	Metro	60	\$965.71	\$965.71	\$0.00	\$1,120.22	\$62.23
Cable negro	BNTECHGO	NEGRO	Metro	60	\$890.10	\$890.10	\$0.00	\$1,032.52	\$57.36
Cable uso rudo	INDIANA	SJT 3 POLOS	Metro	30	\$32.50	\$975.00	\$20.00	\$1,154.20	\$64.12
Cable uso rudo	INDIANA	SJT 3 POLOS	Metro	30	\$47.50	\$1,425.00	\$20.00	\$1,676.20	\$93.12
Filtro de protección	MEVAKU	REJPF1120	Pieza	2	\$75.00	\$150.00	\$85.00	\$272.60	\$15.14
Fuente de voltaje	DELL	MGJN9 Pa-12 Pa-1650-02D4 LA65NS2-01	Pieza	2	\$420.00	\$840.00	\$0.00	\$974.40	\$54.13
Canaleta ranurada	PANDUIT	FC1X3LG2	Pieza	2	\$273.28	\$546.56	\$0.00	\$634.01	\$35.22

COMPONENTE	MARCA	MODELO	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL	ENVÍO	PRECIO CON IVA INCLUIDO	PRECIO EN USD
Pasa cables	BSAI	10 A 14 mm	Pieza	20	\$9.00	\$180.00	\$30.00	\$243.60	\$13.53
PLC	SIEMENS	6ES7214-1BG40-0XB0	Pieza	1	\$5,447.00	\$5,447.00	\$890.00	\$7,350.92	\$408.38
Módulo entradas analógicas	SIEMENS	6ES7231-4HD32-0XB0	Pieza	1	\$3,890.00	\$3,890.00	\$890.00	\$5,544.80	\$308.04
Módulo salidas analógicas	SIEMENS	6ES7222-1BF32-0XB0	Pieza	1	\$2,430.00	\$2,430.00	\$890.00	\$3,851.20	\$213.96
Módulo entradas analógicas	SIEMENS	6ES7231-4HF32-0XB0	Pieza	1	\$4,341.00	\$4,341.00	\$890.00	\$6,067.96	\$337.11
HMI	OMRON	NB7W-TW01B	Pieza	1	\$9,193.00	\$9,193.00	\$867.00	\$11,669.60	\$648.31
Válvulas solenoides	ACARPSGROUP STORE	SERIE 2W	Pieza	4	\$260.00	\$1,040.00	\$1,310.00	\$2,726.00	\$151.44
Bombas	MAGNETIG	MP-15RM	Pieza	1	\$600.00	\$600.00	\$689.00	\$1,495.24	\$83.07
TOTAL								\$60,237.48	\$3,346.53

4.7.9. Producto final del proceso de producción de cerveza

En la producción de la cerveza geotérmica, se obtuvieron dos estilos: STOUT e IPA. Estos estilos fueron embotellados manualmente utilizando encorchadoras y etiquetas personalizadas. Justamente, al ser esto artesanal, no hay un control de llenado. Cada botella tiene una presentación de 355 ml. En cada tanda de proceso, se embotellaron alrededor de 40 frascos por cada estilo de cerveza. Este cuidadoso proceso aseguró que cada botella tuviera la cantidad adecuada de cerveza y estuviera lista para ser disfrutada por los consumidores. La producción de cerveza se aprecia en la **Ilustración 120**.

Ilustración 120

Producción de cerveza artesanal



La **Ilustración 121** muestra a un grupo de compañeros -de izquierda a derecha: David Nava, Christian Nefalí, Brayan González y Emanuel Medina- del Instituto de Ingeniería que se encargaron de llevar a cabo la producción de la cerveza artesanal.

Ilustración 121

Equipo de trabajo de cerveza artesanal geotérmica



5. Conclusiones

El diseño y la implementación de la cervecería geotérmica fue capaz de funcionar para la elaboración de cerveza artesanal. Los documentos de ingeniería proporcionaron información crucial, como los flujos de proceso, las temperaturas y los instrumentos necesarios. Además, dichos documentos permitieron diseñar un tablero eléctrico para controlar el proceso, y los diagramas de tuberías e instrumentación fueron detallados para facilitar la programación del PLC.

En cuanto al control de temperatura, el controlador PID fue aceptable y reguló la temperatura al setpoint establecido. Se planteó la posibilidad de agregar una válvula de alivio de mayor temperatura y enfocarse en controlar la presión. El control de flujo no fue necesario en este sistema, ya que la temperatura dependía del funcionamiento de la resistencia, manteniendo la válvula reguladora de flujo siempre abierta al 100%. Sin embargo, para sistemas con ollas de alrededor de 200 litros y utilizando energía geotérmica, se recomienda implementar el control de flujo para regularlo, ya que nuestra temperatura será constante.

Una ventaja del sistema es su transportabilidad y su capacidad para controlar equipos más grandes y de mayor producción. Se sugiere incorporar en un futuro sensores de nivel para controlar el llenado de las ollas en un entorno industrial.

Las pruebas realizadas arrojaron los resultados deseados, con la excepción de la necesidad de un mejor control del setpoint del hervor para evitar la apertura de la válvula de alivio. En general, los demás procesos fueron sencillos de programar.

En cuanto al tiempo de operación, se logró reducir el tiempo de producción a aproximadamente 5 horas por lote de cerveza, en comparación con las 6 a 7 horas requeridas con otros métodos de energía, como el gas. Se espera que, al implementar energía geotérmica a temperaturas superiores a 120°C, el tiempo de producción se reduzca aún más. La capacidad de los fermentadores es crucial, ya que la producción de un fermentador requiere alrededor de dos semanas para obtener el producto final. Sin embargo, realizar dos tandas en menos tiempo y llenar más fermentadores puede aumentar la producción.

El sistema conserva la esencia artesanal al requerir un sistema semi-automático. En otras palabras, el mayor control de la planta se encuentra en el proceso geotérmico; todas las demás

secuencias aún requieren de mano de obra para realizarse. En caso de implementar el sistema en una escala más grande, se podría considerar eliminar la denominación de "artesanal", ya que podrá ser totalmente automatizado.

6. Bibliografía

- Automationdirect. (2023). *AD-SSR210-22-DCZ*. Obtenido de https://www.automationdirect.com/ad/shopping/catalog/relays_-z-_timers/solid_state_relays/ad-ssr210-22-dcz
- Ehu. (2023). *Transductores*. Obtenido de <https://www.ehu.eus/acustica/espanol/electricidad/transes/transes.html#:~:text=Un%20transductor%20es%20un%20dispositivo,tipo%20de%20energ%C3%ADa%20en%20otra.>
- Ablin, L. (2018). *El mercado de la cerveza*. Obtenido de alimentos argentinos: https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/contenido/sectores/bebidas/Informes/Cerveza_02_2011_05May.pdf
- Andraca Gutiérrez, F. (2012). *Modelado Inicial Para Yacimientos Geotérmicos Durante La Etapa De Exploración*. México: Universidad Nacional Autónoma De México.
- Artesanal. (s.f.). *Cómo calcular el volumen de agua para la maceración y cocción en la preparación de cerveza*. Obtenido de cerveza-artesanal: <https://www.cerveza-artesanal.co/como-calcular-el-volumen-de-agua-para-la-maceracion-y-coccion-en-la-preparacion-de-cerveza/>
- Autycom. (17 de agosto de 2020). *¿Qué es un sistema HMI?* Obtenido de autycom: <https://www.autycom.com/que-es-un-sistema-hmi/>
- Boltronic. (2021). *Marcas de PLC más utilizadas en la industria*. Obtenido de Boltronic: <https://blog.boltronic.com.mx/marcas-de-plc-m%C3%A1s-utilizadas-en-la-industria>
- Bright. (2020). *¿Cómo carbonatar la cerveza?* Obtenido de brightsoluciones: [https://www.brightsoluciones.cl/como-carbonatar-la-cerveza#:~:text=La%20carbonataci%C3%B3n%20\(o%20en%20general,boca%20y%20expresi%C3%B3n%20de%20sabores.](https://www.brightsoluciones.cl/como-carbonatar-la-cerveza#:~:text=La%20carbonataci%C3%B3n%20(o%20en%20general,boca%20y%20expresi%C3%B3n%20de%20sabores.)
- Casera, C. (2015). *Crea tu propia cerveza*. Obtenido de cervezacasera: <https://cervezacasera.com.mx/fermentacion/>
- CeMIEGeo. (2016). *Geotermia en México*. Obtenido de cemiego.org: <https://cemiego.org/index.php/geotermia-en-mexico>
- cervecedores, P. (2017). *Hervor de la cerveza*. Obtenido de tresjotasbeerclub: <https://tresjotasbeerclub.com/hervor-de-la-cerveza/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20el%20hervor%20de%20la%20cerveza%3F&text=El%20hervor%20de%20la%20cerveza%20es%20un%20proceso%20muy%20importante,el%20proceso%20de%20la%20maceraci%C3%B3n.>

- Clifford, T. (2007). *La tierra: Earth Science*. Estados Unidos: Rourke Educational Media. Obtenido de Unión CDMX: <https://www.unioncdmx.mx/2020/10/07/la-corteza-terrestre-y-el-movimiento-de-las-placas-tectonicas/>
- Cocina, L. (2018). *Larousse Cocina*. Obtenido de Larousse Cocina: <https://laroussecocina.mx/palabra/cerveza-2/>
- Daniel, J. (20 de julio de 2018). *Como comprender y usar las entradas analógicas en los PLC*. Obtenido de Canal Gestión Integrada: <https://www.inesem.es/revistadigital/gestion-integrada/tratamiento-entradas-analogicas-plc/>
- Dickson, M. &. (2012). *¿Qué es la Energía Geotérmica?* Obtenido de lis.edu: http://www.lis.edu.es/uploads/812fe7d1_d505_4825_9db3_8438d78a406c.PDF
- Diferenciador. . (26 de febrero de 2020). *Diferenciador*. Obtenido de Sistema digital y sistema analógico: diferencias, ventajas y desventajas.: <https://www.diferenciador.com/sistema-digital-y-sistema-analogico/#:~:text=La%20principal%20diferencia%20entre%20si>
- DOMINION. (2022). Obtenido de <https://dominion.com.mx/tienda/inicio/131-termostato-fc-220-vac-t6861h2wg-ch.html>
- ECA. (2017). *Escuela Cervecera*. Obtenido de [escuelacervecera](http://escuelacervecera.com): <https://blog.escuelacervecera.com/2017/08/09/la-historia-del-oktoberfest/>
- eicos. (2014). *¿Qué es un Sensor de Nivel?* Obtenido de eicos: <http://www.eicos.com/datos-tecnicos/que-es-un-sensor-de-nivel/>
- Fernández, A. (2021). *El proceso de malteado en 3 pasos*. Obtenido de la Academia de la Cerveza: <https://sabeer.es/el-proceso-de-malteado-en-3-pasos/#:~:text=El%20proceso%20de%20modificaci%C3%B3n%20del,la%20denominada%20%E2%80%9Cmalta%20verde%E2%80%9D>.
- Ferreya, L. (2018). *Elaboración de cerveza: Historia y evolución*. Obtenido de Laboratorio de investigación en Productos Agroindustriales: <https://mascapacitacionencerveza.wordpress.com/molienda/#:~:text=La%20molienda%20consiste%20en%20romper,su%20vez%20el%20interior%20del>
- Galicia, C. A. (2018). *Grados de protección IP en los equipos e instalaciones*. Obtenido de electrico: http://electrico.copaipa.org.ar/attachments/102_Interpretaci%C3%B3n%20de%20los%20Grados%20de%20Protecci%C3%B3n%20seg%C3%BAAn%20IEC%20y%20NEMA.pdf
- García. (20 de julio de 2019). *El profesor garcia* . Obtenido de youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=gtsZ2hswKJK>
- Garduño, A. (2013). *Simulación del proceso de fermentación de cerveza artesanal*. Obtenido de Ingeniería Investigación y Tecnología.: México

- Gasga, C. (s.f.). *Diagrama de flujo y de proceso*. Instituto de ingeniería UNAM, Ciudad de México.
- GSL INDUSTRIAS. (22 de agosto de 2022). *RTD SENSOR*. Obtenido de GSL INDUSTRIAS:
<https://industriasgsl.com/blogs/automatizacion/rtd-sensor>
- HETPRO. (10 de febrero de 2015). *BeagleBone Black*:. Obtenido de PWM. HeTPro-Tutoriales; HETPRO:
<https://hetpro-store.com/TUTORIALES/beaglebone-black-pwm/>
- Hiriart Le Bert, G. (2008). *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*. Obtenido de México:
Comisión reguladora de Energía.
- IIDEA, G. (2023). Ciudades de la república mexicana con actividad geotérmica para generación eléctrica.
Oswaldo, Santiago Cruz Freddy. Instituto de Ingeniería grupo IIDEA, México.
- Industrias, G. (1 de junio de 2021). *¿QUÉ ES UN PLC Y CÓMO FUNCIONA?* Obtenido de GSL Industrias:
<https://industriasgsl.com/blogs/automatizacion/que-es-un-plc-y-como-funciona>
- Izquierdo G., A. V. (2008). *Comisión Federal De Electricidad Subdirección De Generación Gerencia De Proyectos Geotermoeléctricos Geotermia*. Obtenido de mygeoenergynow.org:
<https://publications.mygeoenergynow.org/journals/Geotermia-Vol21-2.pdf>
- Kohlhase, K. (15 de septiembre de 2020). *La PWM: ¿Qué es? ¿Cómo puedo utilizarla?* Obtenido de digikey: <https://www.digikey.com.mx/es/blog/pulse-width-modulation#:~:text=La%20PWM%20convierte%20una%20se%C3%B1al,momento%20en%20que%20se%20apaga.>
- Lacayo, G. (2021). *Análisis De Viabilidad Para Implementación De Sistemas De Climatización Con Geotermia En Viviendas De Honduras*. Obtenido de México: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA
- Levabeer. (2019). *La Fermentación En La Cerveza*. Obtenido de levabeer.com: <https://levabeer.com/la-fermentacion-en-la-cerveza/>
- logicbus. (2023). *Sensores de Temperatura RTD*. Obtenido de logicbus:
<https://www.logicbus.com.mx/sensor-temperatura-RTD.php>
- Mario Alberto Perez, A. P. (2007). *Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo*. Universidad Nacional de San Juan: Departamento de Electrónica.
- Matthew. (17 de octubre de 2022). *8 Aplicaciones y usos de relés de estado sólido*. Obtenido de GEYA Electrical Equipment Supply.: <https://www.geya.net/es/8-solid-state-relay-applications-and-uses/#:~:text=Los%20rel%C3%A9s%20de%20estado%20s%C3%B3lido%20se%20utilizan%20amp>
li

- Mellado, P. (2019). *Congreso Nacional de Chile*. Obtenido de Energía Geotérmica: Principales usos. Ejemplos de incentivos para su desarrollo.: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/28130/2/BCN_Energia_Geotermica_principales_usos_definitivo.pdf
- Newark. (2021). *Sensor de Nivel Óptico*. Obtenido de Newark.com.: <https://mexico.newark.com/carlo-gavazzi/vp01ep/level-sensor-optical-pnp-o-p/dp/16C7027#>
- Núñez, P. (2008). *Geotermia*. Obtenido de archivochile: https://www.archivochile.com/Chile_actual/patag_sin_repre/03/
- Omron. (2023). *La HMI más rentable*. Obtenido de <https://industrial.omron.es/es/products/nb>
- Pablo. (2020). *Cómo carbonatar cerveza*. Obtenido de Cerveza Artesanal: <https://hacercervezaartesanal.com/como-carbonatar-cerveza-artesanal-tabla-de-carbonatacion/>
- Peña Baños, A. (2020). *Metodología para el modelado numérico de un yacimiento geotérmico a partir de información de registros de pozos presión-temperatura /*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pérez González, E. (2023). *Sistema deshidratador geotérmico de alimentos (DGA 200) funcionamiento y análisis sensorial y microbiológico /*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Promix. (2022). *Aireación: ¿Qué es y cuán importante es?* Obtenido de Pthorticulture: <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/aireacion-que-es-y-cuan-importante-es/#:~:text=La%20aireaci%C3%B3n%20se%20refiere%20a,la%20densidad%20aparente%20del%20sustrato.>
- Rechner-sensors. (2019). *El sensor de nivel*. Obtenido de rechner-sensors: <https://www.rechner-sensors.com/es/documentacion/knowledge/el-sensor-de-nivel#:~:text=sensores%20de%20nivel%3F-%2BFQu%C3%A9%20tipos%20de%20sensores%20de%20nivel%20existen%20y%20c%C3%B3mo%20funcionan,de%20conductividad%20y%20sistemas%20capacitivos.>
- Reyna, M. (2018). *Apuntes para la historia de la cerveza en México*. Obtenido de Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Roca Cusido, A. (Septiembre de 2014). *Control automático de procesos industriales: Con prácticas de simulación y análisis por ordenador PC*. España: Ediciones Díaz de Santos. Obtenido de ingenieriaquimicareviews: <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2021/09/lazo-de-control.html>
- S.A. (2022). *Sistemas Digitales y Analógicos*. Obtenido de Academia de PLC: <https://www.academiadepc.com/blog/sistemas-digitales-y-analogicos>

Sara. (2017). *Rivas Robotics*. Obtenido de Robots Manipuladores: <https://rivasrobotics.com/robots-manipuladores/>

SDIndustrial. (2018). *Tipos y usos de instrumentos de medición y control*. Obtenido de sdindustrial: <https://sdindustrial.com.mx/blog/tipos-y-usos-de-instrumentos-de-medicion-y-control/#:~:text=Se%20define%20a%20los%20instrumentos,alguna%20anomal%C3%ADa%20previniendo%20alg%C3%BAn%20posible>

Sgm. (2017). *Geotermia*. Obtenido de sgm.gob.mx: https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Geotermia.html

Soraya, D. (2021). *¿Cómo haces el macerado de tu cerveza?* Obtenido de novus.com: <https://www.novus.com.br/blog/como-haces-el-macerado-de-tu-cerveza/?lang=es#:~:text=El%20macerado%20elimina%20los%20almidones,la%20sensaci%C3%B3n%20de%20la%20cerveza.>

Suárez, M. (2013). *Cerveza: Componentes Y Propiedades*. Obtenido de Universidad De Oviedo.

Suhissa. (29 de diciembre de 2018). *¿Qué son las Válvulas de Control?* Obtenido de Suhissa. : <https://suhissa.com.mx/que-son-las-valvulas-de-control/>

Teii. (2023). *Relevadores de estado solido, SSR*. . Obtenido de Teii.com.mx.: <http://www.teii.com.mx/relevadores-estado-solido-ssr.html>

Thebeerbox. (15 de 01 de 2009). *Thebeerbox | Cervezas*. Obtenido de La Maravillosa Historia de la Cerveza.: <https://thebeerbox.wordpress.com/%C2%A1la-autentica-cerveza-2/la-maravillosa-historia-de-la-cerveza/>

Transductor. (10 de febrero de 2023). *Transductores - Qué son, tipos y usos*. Obtenido de Transductor.net. : <https://transductor.net/>

Transec. (2021). *transec*. Obtenido de <https://www.transec.com.ar/soporte/18450/que-es-un-motor-electrico-y-como-funciona/>

Ultrasonics, H. (2021). *Malteado ultrasónico y germinación de la malta*. Obtenido de hielscher: <https://www.hielscher.com/es/ultrasonic-malting.html>

UNAM, I. d. (2018). *Desarrollan mapa de zonas geotérmicas de México – Proyecto FSE*. Obtenido de Proyecto FSE: <http://www.proyectorfse.mx/2017/05/29/desarrollan-mapa-zonas-geotermicas-mexico/>

Vicente, T. (2014). *ENERGÍA GEOTÉRMICA*. Obtenido de Biológicamente hablando: <https://teresavicentemartin.wordpress.com/2014/01/31/energia-geotermica/>

Villajulca, J. C. (28 de agosto de 2018). *Resumen P, I, D*. Obtenido de instrumentacionycontrol.net:
<https://instrumentacionycontrol.net/resumen-p-i-d-lo-justo-y-necesario-que-debes-saber-y-que-nunca-entendiste/>

Zarza, L. (12 de mayo de 2021). *¿Qué es un caudalímetro y cuántos tipos hay?* Obtenido de Connecting Waterpeople: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-caudalimetro-y-cuantos-tipos-hay#:~:text=Un%20caudal%C3%ADmetro%20es%20un%20instrumento,tuber%C3%ADa%20que%20transporta%20el%20fluido.>

7. Anexos

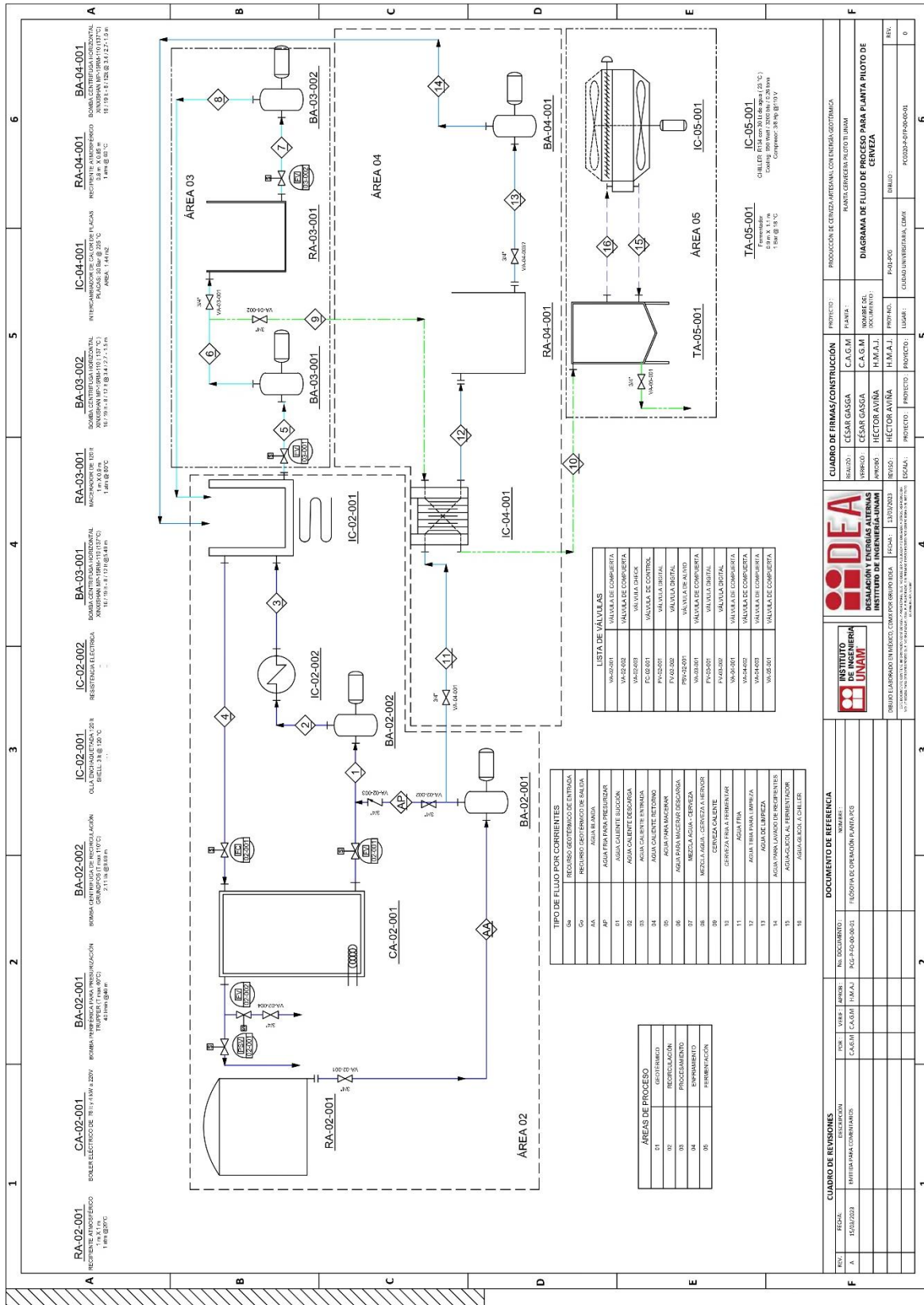
7.1. Tablas de protección de equipos

Tabla 11

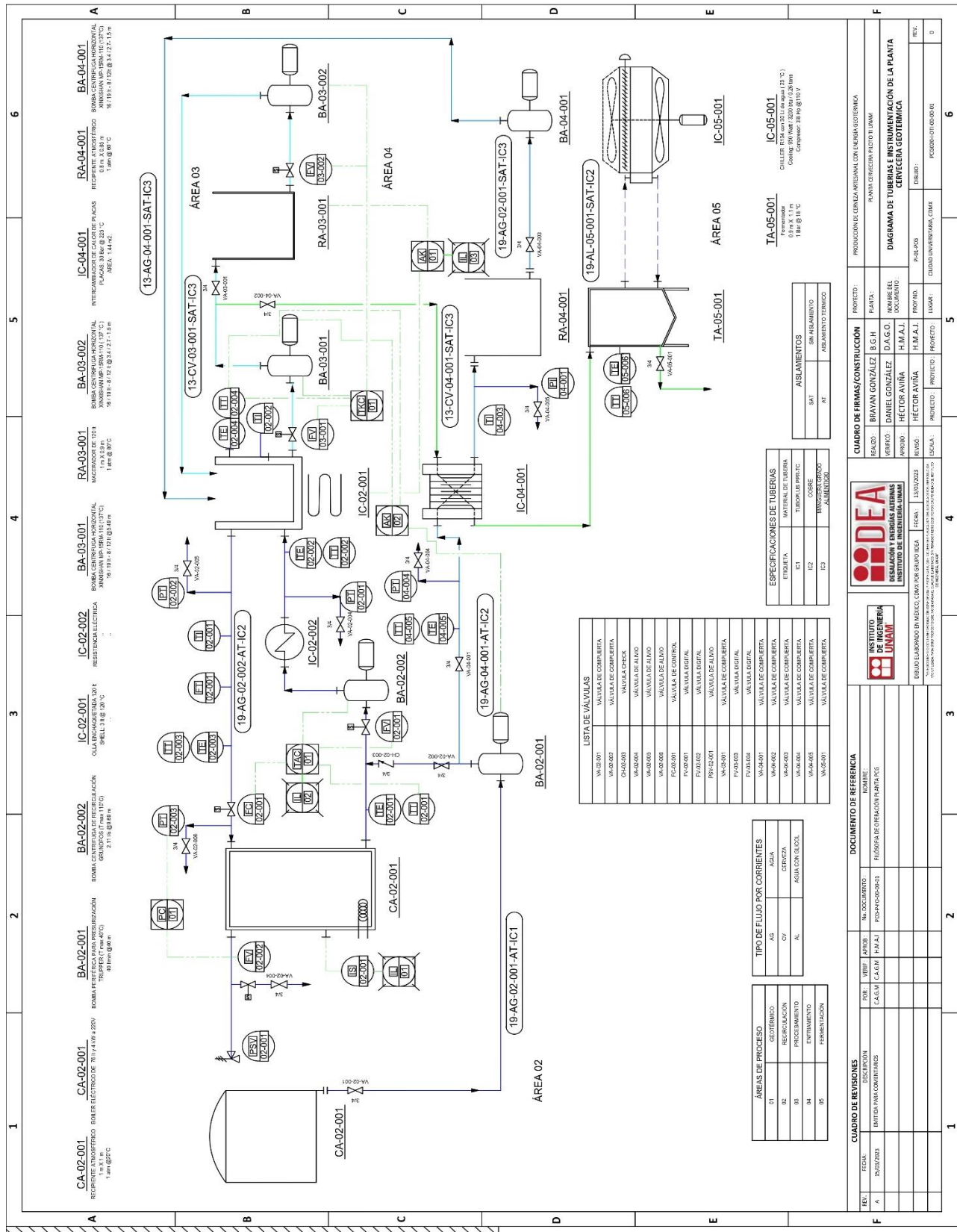
Protección de instrumentos

GRADO DE PROTECCIÓN CONTRA INGRESO DE POLVO Y HUMEDAD						
Código	Primer Dígito		Segundo Dígito		Tercer Dígito	
	Contra Ingreso de Objetos Sólidos		Contra Ingreso de Líquidos		Contra Impactos Mecánicos	
IP	0	No protegido	0	No protegido	0	No protegido
	1	Partículas >50 mm	1	Goteo vertical	1	Impacto de 0.225 J (0.15 kg a 15 cm)
	2	Partículas >12 mm	2	Rocío directo hasta 15°	2	Impacto de 0.375 J (0.25 kg a 15 cm)
	3	Partículas >2.5 mm	3	Rocío directo hasta 60°	3	Impacto de 0.500 J (0.25 kg a 20 cm)
	4	Partículas >1.0 mm	4	Salpicadura de agua	4	Impacto de 1.000 J (0.50 kg a 20 cm)
	5	Protegido contra polvo	5	Chorro de agua a baja presión	5	Impacto de 2.000 J (0.50 kg a 40 cm)
	6	Hermético al polvo	6	Fuertes chorros de agua	6	Impacto de 4.000 J (1 kg a 40 cm)
			7	Inmersión temporal 15 cm a 1mt	7	Impacto de 6.000 J (1.50 kg a 40 cm)
			8	Inmersión continua	8	Impacto de 10.000 J (5 kg a 20 cm)
					9	Impacto de 20.000 J (5 kg a 40 cm)
Ejemplo: IP65 - Hermético al polvo y contra chorro de agua					1 Julio (J) = 0.102 kg/m	

7.2. Diagrama de Flujo y de Proceso



7.3. Diagrama de tuberías e instrumentación



VALVULA	TIPO	DESCRIPCIÓN
VA-02-001	IC	VÁLVULA DE CUBIERTA
VA-02-002	IC	VÁLVULA DE CUBIERTA
CH-02-003	IC	VÁLVULA CHECK
VA-03-004	IC	VÁLVULA DE ALIVO
VA-03-005	IC	VÁLVULA DE ALIVO
VA-03-006	IC	VÁLVULA DE ALIVO
FC-03-007	IC	VÁLVULA DE CONTROL
FL-03-008	IC	VÁLVULA DIGITAL
FL-03-009	IC	VÁLVULA DIGITAL
FL-03-010	IC	VÁLVULA DE ALIVO
FL-03-011	IC	VÁLVULA DE CUBIERTA
FL-03-012	IC	VÁLVULA DIGITAL
FL-03-013	IC	VÁLVULA DIGITAL
FL-03-014	IC	VÁLVULA DIGITAL
VA-04-001	IC	VÁLVULA DE CUBIERTA
VA-04-002	IC	VÁLVULA DE CUBIERTA
VA-04-003	IC	VÁLVULA DE CUBIERTA
VA-04-004	IC	VÁLVULA DE CUBIERTA
VA-04-005	IC	VÁLVULA DE CUBIERTA
VA-05-001	IC	VÁLVULA DE CUBIERTA

TIPO DE FLUIDO	DESCRIPCIÓN
A1	AGUA
A2	AGUA
CF	CEFRINA
AL	AGUA CON CLORO

ÁREA	DESCRIPCIÓN
01	GESTIÓN
02	RESERVA
03	PROCESAMIENTO
04	ENFRÍAMENTO
05	FERMENTACIÓN

ETIQUETA	MATERIAL DE TUBERÍA	TUBO DE PRÁCTICO	TIPO DE SOLDADURA	ABRILANTADO
E1	CS	CS	CS	SIN ABRILANTADO
E2	COBRE	COBRE	COBRE	ABRILANTADO
E3	ALUMINIO	ALUMINIO	ALUMINIO	ABRILANTADO

ABRILANTADO	DESCRIPCIÓN
S1	SIN ABRILANTADO
AT	ABRILANTADO TÉRMICO

ABRILANTADO	DESCRIPCIÓN
S1	SIN ABRILANTADO
AT	ABRILANTADO TÉRMICO

CUADRO DE REVISIONES		DOCUMENTO DE REFERENCIA	
FECHA	REVISIÓN	TÍTULO	FECHA
28/02/2013	1	PROYECTO DE OBRAS DE RECONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE	28/02/2013

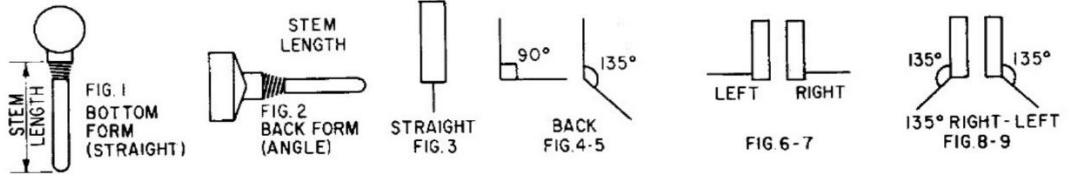
CUADRO DE FIRMAS/CONSTRUCCIÓN		PROYECTO	
REALIZADO	REVISADO	PROYECTO	PROYECTO
DANIEL GONZÁLEZ B.G.H.	H.M.A.L.	PROYECTO <td>PROYECTO</td>	PROYECTO
HECTOR ANAYA	H.M.A.L.	PROYECTO <td>PROYECTO</td>	PROYECTO

CUADRO DE REVISIONES		DOCUMENTO DE REFERENCIA	
FECHA	REVISIÓN	TÍTULO	FECHA
28/02/2013	1	PROYECTO DE OBRAS DE RECONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE	28/02/2013

7.4.2. Hojas de datos de indicadores de temperatura

<p>DESALACIÓN Y ENERGÍAS ALTERNAS INSTITUTO DE INGENIERÍA-UNAM</p> <p>INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM</p>	Hoja de datos Instrumentos de temperatura INDICADORES				Hoja 1	De 1	
	Esp. Num.				Rev. A		
	Num.	Por	Fecha	Revision			
	1	BGH	28/04/2023	A			
					Revisiones		
					Creado por:	Revisado:	Aprobado:
					BGH	DAGO	HMAJ



<p>TERMOMETRO</p> <p>1.- Vastago: Roscado [X] Liso [] Union [] Material SS304</p> <p>2.- Vastago o hilo de unión: 1/2 in. [X] 3/4 in. []</p> <p>3.- Diametro del vastago: STD [] .250 in. [X] .375 in. []</p> <p>4.- Case Material: STD [X] Otro _____</p> <p>5.- Diametro del disco: 3 in. Color: Blanco</p> <p>6.- Dimension de escala: +/-1% Color: Negro</p> <p>7.- Forma: Num, de Figura 2 Ajustable []</p> <p>8.- Calibrador externo [] Sellado hermeticamente []</p> <p>9.- MFR & Numero de modelo: Bmp/0-150/c3-v6</p>	<p>POZO</p> <p>10. Ninguno [] Incluido [] Otros [X]</p> <p>11.- Material: 304SS [] 316SS [X]</p> <p>Otro: _____</p> <p>12.- Construcción Perforado [X] Build-Up []</p> <p>Otro: _____</p>
--	--





Revisión	Num. De TAG	Rango	Temp. De Operación	Longitud del vastago	Conec. De Pozo	Lag. Ext.	Servicio	Notas (no.)
A	TI0201	0-200°C	24 - 100 °C	2.5 in	1/2 NPT in.	22 mm	RECIRCULACIÓN	-
A	TI0202	0-150°C	24 - 100 °C	2.5 in	1/2 NPT in.	22 mm	RECIRCULACIÓN	-
A	TI0403	0-200°C	24 -60 °C	2.5 in	1/2 NPT in.	22 mm	ENFRIAMIENTO	-

NOTAS:



7.4.3. Hojas de datos de transmisor de flujo

 DEA DESALACIÓN Y ENERGÍAS ALTERNAS INSTITUTO DE INGENIERÍA-UNAM  INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM®		Hoja de datos				Hoja 1 De 1	
		Transmisor de Flujo				Esp. Num.	Rev. A
		Num.	Por	Fecha	Revision		
	1	BGH	28/04/2023	A		Fecha. 28/04/2023	
					Solicitud de pedido		
					Por BGH	Revisado: DAGO	
						Aprobado HMAJ	
GENERAL	1	Numero de Tag	FT0201				
	2	Servicio	Recirculación				
	3	Num. De Línea/Vessel No.	19-AG-02-002-SA-IC2				
	4	Full Nozzle/ Semi Nozzle					
	5	Seguridad o Alivio					
	6	Conv., Bellows, Pilot Op.					
	7	Bonnet Type					
CONN.	8	Tamaño: Inlet	1/2 "	1/2 "			
	9	Clasificación de Brida o Atornillado					
	10	Tipo de Facing					
Materiales	11	Body and Bonnet	Latón				
	12	Seart and Disc	Latón				
	13	Resilient Seat Seal					
	14	Guia y Anillos	Acero Inoxidable				
	15	Resorte	Acero Inoxidable				
	16	Bellows					
	17						
Opciones	18	Cap: Screwed or Bolted					
	19	Lever: Plain or Packed					
	20	Test Gage					
	21						
	22						
Basis	24	Código					
	25	Fuego					
	26						
Datos del Fluido	28	Fluido y Estado	Agua				
	29	Capacidad Requerida	25 l/m				
	30	Peso molar					
	31	Presión de Op.	1.75 Mpa				
	32	Temperatura de Op.	120 °C				
	33	Contra Presión	Constante				
	34		Variable				
	35		Total				
	36	% Sobrepresión Permitida					
	37	Factor de Sobrepresión					
	38	Factor de Compresibilidad					
	39	Vapor Caliente de Vaporización					
	40	Relación de Calores específicos					
	41	Viscosidad de Operación					
	42	Presión Barométrica					
43							
44							
	45	Calc. Area sq. in.					
	46	Área Seleccionada					
	47	Designación de Orificio					
	48	Fabricante	HXZ				
	49	Num. De Modelo	YF-B1				
50	N. de Hilos	3					
51	Entrada	5-18 VDC					
52	Salida de pulsos	4.7 VDC					
Notas:							


7.4.4. Hojas de datos de transmisor de temperatura

 DESALACIÓN Y ENERGÍAS ALTERNAS INSTITUTO DE INGENIERÍA-UNAM 		Hoja de datos				Hoja 1	De 2	
		Instrumentos de temperatura				Esp. Num.	Rev. A	
		Num.	Por	Fecha	Revision			
		1	BGH	28/04/2023	A		28/04/2023	
						Revisiones		
		Creado por:		Revisado:	Aprobado:			
		BGH		DAGO	HMAJ			
1	Num. De Tag	TTXXXX					Servicio	Recirculación
2	Funcion	Registrador [] Indicador [] Control [] Blind [] Transmitir [X] Otro: _____						
3	Carcaza	MFR STD [X] Tamaño Nominal _____ Color: MFR STD [X] Otro _____						
4	Montaje	Flush [] Superficial [X] Yoke [] Otro _____						
5	Proteccion	Proposito general [] Proteccion a Agua [X] Proteccion a Explosión [] Clase: IP67 Para sistemas intrínsecamente seguros [] Otro _____						
6	Alimentacion	117 V 60 HZ [] Otra AC _____ DC [X] 24 V						
7	Chart	Strip [] Roll [] Fold [] Circular _____ Time Marks []						
8	Chart Drive	Velocidad _____ Energía _____						
9	Escala	Tipo: DIGITAL AJUSTABLE Rango 1 -50 A 150 °C 2 _____ 3 _____ 4 _____						
XMTR	10 Salida del transmisor	4-20 mA [X] 10-50 mA [] 21-103 Kpa (3-15 psig) [] Otro _____ Para receptor, ver la hoja de especificaciones						
Controlador	11 Modos de control	P=Proporcional {Ganancia}, I=Integral{Reinicio automatico}, D=Derivativo {Velocida} Sub: s=Lento f=Rapido P [] PI [] PD [] PID [] If [] Df [] Is [] Ds [] Otro: APLICACIÓN DE MONITOREO SOLAMENTE						
12	Accion	Medicion de la salida: Incremento [] Decremento []						
13	Switch automatico	Ninguno [X] MFRSTD [] Otro _____						
14	Boton de ajuste	Manual [] Externo [] Remoto [X] Otro _____						
15	Regulación manual	Ninguno [X] MFRSTD [] Otro _____						
16	Salida	4-20 mA [] 10-50 mA [] 21-103 Kpa (3-15 psig) [] Otro _____						
Elemento	17 Llenado	SAMA Clase _____ Compensación _____						
18	Procesador de datos	Temp: Normal 24°C Max 110°C Pres. Max. 10 bar						
19	Rango	Fijo [] Rango Adj. [X] Set At -50 A 120 °C						
20	Bulbo	Tipo _____ Mtl. _____ Extensión: Longitud _____ Tipo _____ Tamaño: Diametro _____ Longitud _____ Insertion _____						
21	Capilar	MFR STD [X] Longitud _____ Mtl. _____ Armor _____						
22	Well	Mtl. _____ Insertion [X] Lag Ext. 4 inch Conn 1/8" NPT						
23	Switch Alarma	Cantidad _____ Form _____ Clasificación _____						
24	Funcion	Temp [X] Desviación [] Contacts To _____ On Temp. Increase						
25	Opciones	Filt- Reg. [] Sup. Gage [] Output Gage [] Charts						
26	Mfr. & Model No.	Otro _____						
		RTDM12-1/8NPT-3MM-24MM-A						
Notas:								



7.4.5. Hojas de datos de transmisor de presión

 		Hoja de datos Instrumentos de presión				Hoja 1	De 2	
		Num.	Por	Fecha	Revision	Esp. Num. DGA600-I-HD-00-005	Rev. A	
		1	BGH	28/04/2023	A		28/04/2023	
		Solicitud de pedido						
		Creado por: BGH		Revisado: DAGO		Aprobado HMAJ		
GENERAL	1 Num. De Tag	PTXXXX Servicio: Recirculación						
	2 Función	Registrador [] Indicador [] Control [] Blind [] Transmitir [X] Otro: _____						
	3 Caso	MFR STD [X] Tamaño Nominal _____ Color: MFR STD [X] Otro _____						
	4 Montaje	Flush [] Superficial [X] Yoke [] Otro _____						
	5 Protección	Propósito general [] Protección a Agua [] Protección a Explosión [] Clase: IP67 Para sistemas intrínsecamente seguros []						
	6 Alimentación	117 V 60 HZ [] Otra AC _____ DC [X] 24 V						
	7 Chart	Strip [] _____ Roll [] _____ Fold [] Circular _____ Times Marks _____						
	8 Chart Drive	Velocidad _____ Energía _____						
	9 Escala	Tipo: AJUSTABLE _____ Rango 1 0 a 100psi 2 0-1000 psi 3 _____						
XMTR	10 Salida del transmisor	4-20 mA [X] 10-50 mA [] 21-103 Kpa (3-15 psig) [] Otro _____ Para receptor, ver la hoja de especificaciones						
Controlador	11 Modos de control	P=Proporcional (Ganancia), I=Integral(Reinicio automatico), D=Derivativo (Velocida) Sub: s=Lento f=Rapido P [] PI [] PD [] PID [] If [] Df [] Is [] Ds [] Otro: APLICACION DE MONITOREO SOLAMENTE						
	12 Acción	Medición de la salida: Incremento [] Decremento []						
	13 Switch automatico	Ninguno [] MFRSTD [] Otro _____						
	14 Boton de ajuste	Manual [] Externo [] Remoto [] Otro _____						
	15 Regulación manual	Ninguno [] MFRSTD [] Otro _____						
	16 Salida	4-20 mA [] 10-50 mA [] 21-103 Kpa (3-15 psig) [] Otro _____						
Elemento	17 Servicio	Presión manométrica [x] Vacío [] Absoluta [x] Compuesta []						
	18 Tipo de Elemento	Diafragma [X] Helice [] Bourdon [] Bellows [] Otro _____						
	19 Material	316L SS [X] Ber. Copper [] Otro _____						
	20 Rango	Fijo [] Rango Adj. [X] Set At _____ Protección para fuera de rango _____						
	21 Datos Procesados	Presión: Normal: 1.7 bar Maxima: 6.8 bar Rango de elemento: 0 psi- 100 psi						
	22 Conexión del proceso	1/4 in. NPT [X] 1/2 in. NPT [] Otro _____ Posición: Fondo [] Atrás [] Otro _____						
	23 Switch Alarma	Cantidad _____ Form _____ Clasificación _____						
	24 Función	Presión [] Desviación [] Contacts To _____ On Temp. Increase						
Opciones	25 Opciones	Filt- Reg. [] Sup. Gage [] Output Gage [] _____ Charts Diaph Seal [] Tipo _____ Diaph _____ Bot Bowl _____ Conn _____ Capillary: Lengh _____ Mtl. _____ Otro _____						
	26 MFR & Model No.	PX119-100AI, SPTD25-20-1000H						
Notas:								

7.4.6. Hojas de datos de válvulas de control

		Hoja de datos				Hoja 1	De 1
		Valvulas Solenoides				Esp. Num.	Rev. A
		Num.	Por	Fecha	Revision		
		1	BGH	28/04/2023	A		
							Fecha. 28/04/2023
						Solicitud de pedido	
						Por BGH	Revisado: DAGO
							Aprobado HMAJ
GENERAL	1	Numero de Tag	FC0201				
	2	Servicio	RECIRCULACION				
	3	Num. De Linea/Vessel No.	19-AG-02-002-SA-IC2				
	4	Full Nozzle/ Semi Nozzle					
	5	Seguridad o Alivio	SEGURIDAD				
	6	Conv., Bellows, Pilot Op.					
	7	Bonnet Type					
CONN.	8	Tamaño: Inlet	Outlet	1 in	1 in		
	9	Clasificación de Brida o Atornillado	EPDM-Seal				
	10	Tipo de Facing					
Materiales	11	Body and Bonnet	Acero inoxidable				
	12	Seart and Disc	Acero inoxidable				
	13	Resilient Seat Seal					
	14	Guia y Anillos	Acero inoxidable				
	15	Resorte	Acero inoxidable				
	16	Bellows					
Opciones	18	Cap: Screwed or Bolted	Bolted				
	19	Lever: Plain or Packed					
	20	Test Gage					
	21						
	22						
Basis	24	Código					
	25	Fuego					
	26						
	27						
Datos del Fluido	28	Fluido y Estado	Agua				
	29	Capacidad Requerida	0.28 l/s				
	30	Peso molar					
	31	Presión de Op.	1.75 bar				
	32	Temperatura de Op.	100 °C				
	33	Contra Presión	Constante				
	34		Variable				
	35		Total				
	36	% Sobrepresión Permitida					
	37	Factor de Sobrepresión					
	38	Factor de Compresibilidad					
	39	Vapor Caliente de Vaporización					
	40	Relacion de Calores especificos					
	41	Viscosidad de Operación					
42	Presión Barometrica						
43							
44							
	45	Calc. Area sq. in.					
	46	Área Seleccionada					
	47	Designacion de Orificio					
	48	Fabricante	TF Water treatment facility				
	49	Num. De Modelo	1/2/1/2				
50	N. de Hilos	5					
51	Entrada	24 VDC					
52	Cableado de control	0 - 10 VDC					
Notas:							

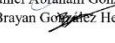
7.4.7. Hojas de datos de válvulas solenoides




 		Hoja de datos				Hoja 1		De 1		
		Valvulas Solenoides				Esp. Num.	Rev. A			
		Num.	Por	Fecha	Revision		Fecha. 28/04/2023			
	1	BGH	28/04/2023	A	Solicitud de pedido					
					Por BGH	Revisado: DAGO	Aprobado HMAJ			
GENERAL	1	Numero de Tag	FV0201	FV0202	FV0303	FV0304				
	2	Servicio	RECIRCULACION	RECIRCULACION	PROCESAMIENTO	PROCESAMIENTO				
	3	Num. De Linea/Vessel No.	19-AG-02-002-SA-IC2	19-AG-02-002-SA-IC2	13-CV-03-001-SA-IC3	13-CV-03-001-SA-IC3				
	4	Full Nozzle/ Semi Nozzle								
	5	Seguridad o Alivio	SEGURIDAD	ALIVIO	SEGURIDAD	SEGURIDAD				
	6	Conv., Bellows, Pilot Op.								
	7	Bonnet Type								
CONN.	8	Tamaño: Inlet Outlet	1/2 in 1/2 in	1/2 in 1/2 in	1/2 in 1/2 in	1/2 in 1/2 in				
	9	Clasificacion de Brida o Atornillado	EPDM-Seal	EPDM-Seal	EPDM-Seal	EPDM-Seal				
	10	Tipo de Facing								
Materiales	11	Body and Bonnet	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Acero inoxidable				
	12	Seart and Disc	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Acero inoxidable				
	13	Resilient Seat Seal								
	14	Guia y Anillos	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Acero inoxidable				
	15	Resorte	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Acero inoxidable				
	16	Bellows								
	17									
Opciones	18	Cap: Screwed or Bolted	Bolted	Bolted	Bolted	Bolted				
	19	Lever: Plain or Packed								
	20	Test Gage								
	21									
Basis	24	Código								
	25	Fuego								
	26									
	27									
Datos del Fluido	28	Fluido y Estado	Agua	Agua	Cerveza	Cerveza				
	29	Capacidad Requerida	0.28 l/s	0.28 l/s	0.28 l/s	0.28 l/s				
	30	Peso molar								
	31	Presión de Op.	1.75 bar	5 bar	1.75 bar	1.75 bar				
	32	Temperatura de Op.	100 °C	100 °C	78 °C	78 °C				
	33	Contra Presión	Constante							
			Variable							
			Total							
	36	% Sobrepresión Permitida								
	37	Factor de Sobrepresión								
	38	Factor de Compresibilidad								
	39	Vapor Caliente de Vaporización								
	40	Relacion de Calores específicos								
	41	Viscosidad de Operación								
42	Presión Barometrica									
43										
44										
45	Calc. Area sq. in.									
	Área Seleccionada									
	Designacion de Orificio									
	Fabricante	Acarpsgroup	Acarpsgroup	Acarpsgroup	Acarpsgroup					
	Num. De Modelo	Serie 2W	Serie 2W	Serie 2W	Serie 2W					
50	DC/AC	24 VDC	24 VDC	24 VDC	24 VDC					
Notas:										

7.4.8. Hojas de datos de interruptores de corriente

 DESAACIÓN Y ENERGÍAS ALTERNAS INSTITUTO DE INGENIERÍA-UNAM		Hoja de datos				Hoja 1		De 1	
		Interruptor de corriente				Esp. Num.	Rev. A		
		Num.	Por	Fecha	Revision		Fecha. 28/04/2023		
		1	BGH	28/04/2023	A	Solicitud de pedido			
						Por	Revisado:	Aprobado	
						BGH	DAGO	HMAJ	
GENERAL	1	Numero de Tag	IS0201						
	2	Servicio	Recirculación						
	3	Num. De Linea/Vessel No.	19-AG-02-002-SA-IC2						
	4	Full Nozzle/ Semi Nozzle							
	5	Seguridad o Alivio	Seguridad						
	6	Conv., Bellows, Pilot Op.							
	7	Bonnet Type							
	8	Calc. Area sq. in.							
	9	Área Seleccionada							
	10	Designacion de Orificio							
	11	Fabricante	Fearlie						
	12	Num. De Modelo	M3050						
	13	Corriente de Entrada	0-30 A						
	14	Tipo de Salida	Relevador						
Notas:									

7.5. Hojas de calibración de sensores de temperatura

LUGAR DE CALIBRACIÓN
Torre de Ingeniería, 8° Piso, Ala Sur Instituto de Ingeniería, laboratorio de desalación y energías alternas. Universidad Nacional Autónoma de México, Círculo Escolar, Ciudad Universitaria, México, D.F.
IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO A CALIBRAR
Nombre: RTD PT100 Etiqueta: TT0201 Marca: OMEGA Modelo: RTDM12-1/8NPT-3MM-24MM-A Rango: -50°C a 120°C (-58 °F a 248°F) Resolución: 0.1 °C (32.18 °F)
IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO CALIBRADO
Nombre: RTD PT100 Etiqueta: VALOR_PATRÓN Marca: Omega Modelo: RTDM12-1/8NPT-3MM-24MM-A Rango: -50°C a 120°C (-58 °F a 248°F) Resolución: 0.1 °C (32.18 °F)
MÉTODO
En un horno de temperatura que funciona pasando corriente eléctrica a través de un circuito de resistores estaremos transmitiendo la energía calorífica por efecto Joule a una pieza de aluminio que será controlada con un lazo de control PID (Proporcional integral derivador), colocando la temperatura deseada; con los sensores a calibrar serán introducidos en el material, que una vez llegando al valor indicado se esperará un tiempo de estabilización de 10[min], para tomar los cálculos correspondientes, realizando este procedimiento durante 3 interacciones.
RESPONSABLES DE LA CALIBRACIÓN
 Ing. Daniel Abraham González Orellana  Brayan González Hernández

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN							
Valor patrón [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 1 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 2 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 3 [°C]	Valor Leído Promedio [°C]			
45	44.6	44.3	44.40	44.4			
60	59.3	58.7	58.8	58.9			
100	100.5	100	96.6	99.0			
Valor patrón [°C]	Porcentaje error de exactitud [%]	Porcentaje Exactitud [%]	Porcentaje error de precisión [%]	Porcentaje de precisión [%]	Incertidumbre [°C]	Valor más representativo con su incertidumbre [°C]	Precisión de rango normal entre -20 °C y 60 °C
45	1.3	98.7	0.3	99.7	0.09	44.3±0.09	±1°C
60	1.8	98.2	0.4	99.6	0.19	58.7±0.19	±1°C
100	1.0	99.0	2.5	97.5	1.23	96.6±1.23	±1°C
EXPRESIONES MATEMÁTICAS							
$\%EE = \left \frac{V_P - \bar{V}_L}{V_P} \right \times 100$		$\%E = 100 - \%EE$		$\Delta V = S_{mv} = \frac{\pm S_V}{\sqrt{n}}$			
$\%EP = \left \frac{\bar{V}_L - V_{Ld}}{\bar{V}_L} \right \times 100$		$\%P = 100 - \%EP$		$S_V = \pm \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_{Li} - \bar{V}_L)^2}{n-1} \right]^{1/2}$			
Comentarios: Después de realizar dicha prueba, se determinó que el instrumento cumple con los criterios de precisión requeridos y, por lo tanto, está apto para su uso.							
CONDICIONES DE CALIBRACIÓN							
Temperatura ambiente: 28°C							
Fecha de validación: 3/03/23							
 Ing. Daniel Abraham González Orellana		 Brayan González Hernández		 José Manuel Sánchez Espinosa			

LUGAR DE CALIBRACIÓN

Torre de Ingeniería, 8° Piso, Ala Sur
Instituto de Ingeniería, laboratorio de desalación y energías alternas.
Universidad Nacional Autónoma de México,
Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, México, D.F.

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO A CALIBRAR

Nombre: RTD PT100 Etiqueta: TT0202
Marca: OMEGA
Modelo: RTDM12-1/8NPT-3MM-24MM-A
Rango: -50°C a 120°C (-58 °F a 248°F)
Resolución: 0.1 °C (32.18 °F)


IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO CALIBRADO

Nombre: RTD PT100 Etiqueta: PATRÓN
Marca: Omega
Modelo: RTDM12-1/8NPT-3MM-24MM-A
Rango: -50°C a 120°C (-58 °F a 248°F)
Resolución: 0.1 °C (32.18 °F)

MÉTODO

En un horno de temperatura que funciona pasando corriente eléctrica a través de un circuito de resistores estaremos transmitiendo la energía calorífica por efecto Joule a una pieza de aluminio que será controlada con un lazo de control PID (Proporcional integral derivador), colocando la temperatura deseada; con los sensores a calibrar serán introducidos en el material, que una vez llegando al valor indicado se esperará un tiempo de estabilización de 10[min], para tomar los cálculos correspondientes, realizando este procedimiento durante 3 interacciones.

RESPONSABLES DE LA CALIBRACIÓN


Ing. Daniel Abraham González Orellana
Brayan González Hernández

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

Valor patrón [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 1 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 2 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 3 [°C]	Valor Leído Promedio [°C]
45	44.9	44.8	44.80	44.8
60	59.8	59.6	59.6	59.7
100	101.4	100.4	99.2	100.3

Valor patrón [°C]	Porcentaje error de exactitud [%]	Porcentaje Exactitud [%]	Porcentaje error de precisión [%]	Porcentaje de precisión [%]	Incertidumbre [°C]	Valor más representativo con su incertidumbre [°C]	Precisión de rango normal entre -20 °C y 60 °C
45	0.37	99.63	0.07	99.93	0.03	44.8±0.03	±1°C
60	0.56	99.44	0.11	99.89	0.07	59.6±0.07	±1°C
100	0.33	99.67	1.06	98.94	0.64	101.4±0.64	±1°C

EXRESIONES MATEMÁTICAS


$$\%EE = \left| \frac{V_P - \bar{V}_L}{V_P} \right| \times 100 \quad \%E = 100 - \%EE \quad \Delta V = S_{mV} = \frac{\pm S_V}{\sqrt{n}}$$

$$\%EP = \left| \frac{\bar{V}_L - V_{ref}}{V_L} \right| \times 100 \quad \%P = 100 - \%EP \quad S_V = \pm \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_L - V_i)^2}{n-1} \right]^{1/2}$$


Comentarios: Después de realizar dicha prueba, se determinó que el instrumento cumple con los criterios de precisión requeridos y, por lo tanto, está apto para su uso.

CONDICIONES DE CALIBRACIÓN

Temperatura ambiente: 28°C
Fecha de validación: 3/03/23


Ing. Daniel Abraham González Orellana


Brayan González Hernández


José Manuel Sánchez Espinosa

LUGAR DE CALIBRACIÓN

Torre de Ingeniería, 8° Piso, Ala Sur
Instituto de Ingeniería, laboratorio de desalación y energías alternativas.
Universidad Nacional Autónoma de México,
Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, México, D.F.

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO A CALIBRAR

Nombre: RTD PT100 Etiqueta: TT0203
Marca: OMEGA
Modelo: RTDM12-1/8NPT-3MM-24MM-A
Rango: -50°C a 120°C (-58 °F a 248°F)
Resolución: 0.1 °C (32.18 °F)

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO CALIBRADO

Nombre: RTD PT100 Etiqueta: VALORPatrón
Marca: Omega
Modelo: RTDM12-1/8NPT-3MM-24MM-A
Rango: -50°C a 120°C (-58 °F a 248°F)
Resolución: 0.1 °C (32.18 °F)

MÉTODO

En un horno de temperatura que funciona pasando corriente eléctrica a través de un circuito de resistores estaremos transmitiendo la energía calorífica por efecto Joule a una pieza de aluminio que será controlada con un lazo de control PID (Proporcional integral derivador), colocando la temperatura deseada; con los sensores a calibrar serán introducidos en el material, que una vez llegando al valor indicado se esperará un tiempo de estabilización de 10[min], para tomar los cálculos correspondientes, realizando este procedimiento durante 3 interacciones.

RESPONSABLES DE LA CALIBRACIÓN

Ing. Daniel Abraham González Orellana
Brayan González Hernández

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

Valor patrón [°C]	Indicación instrumento bajo calibración. Interacción 1 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración. Interacción 2 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración. Interacción 3 [°C]	Valor Leído Promedio [°C]
45	44.8	44.8	44.80	44.8
60	59.1	59.2	59.2	59.2
100	100.8	100	97.5	99.4

Valor patrón [°C]	Porcentaje error de exactitud [%]	Porcentaje Exactitud [%]	Porcentaje error de precisión [%]	Porcentaje de precisión [%]	Incertidumbre [°C]	Valor más representativo con su incertidumbre [°C]	Precisión de rango normal entre -20 °C y 60 °C
45	0.44	99.56	0.00	100.00	0.00	44.8±0.00	±1°C
60	1.39	98.61	0.06	99.94	0.03	59.1±0.03	±1°C
100	0.57	99.43	1.94	98.06	0.99	97.5±0.99	±1°C

EXPRESIONES MATEMÁTICAS

$$\%EE = \left| \frac{V_p - \bar{V}_p}{V_p} \right| \times 100 \quad \%E = 100 - \%EE \quad \Delta V = S_{mv} = \frac{\pm S_y}{\sqrt{n}}$$

$$\%EP = \left| \frac{V_L - V_{La}}{V_L} \right| \times 100 \quad \%P = 100 - \%EP \quad S_y = \pm \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

Comentarios: Después de realizar dicha prueba, se determinó que el instrumento cumple con los criterios de precisión requeridos y, por lo tanto, está apto para su uso.

CONDICIONES DE CALIBRACIÓN

Temperatura ambiente: 28°C
Fecha de validación: 3/03/23

Ing. Daniel Abraham González Orellana

Brayan González Hernández

José Manuel Sánchez Espinosa

LUGAR DE CALIBRACIÓN

Torre de Ingeniería, 8° Piso, Ala Sur
Instituto de Ingeniería, laboratorio de desalación y energías alternativas.
Universidad Nacional Autónoma de México,
Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, México, D.F.

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO A CALIBRAR

Nombre: RTD PT100 Etiqueta: TT0204
Marca: OMEGA
Modelo: RTDM12-1/8NPT-3MM-24MM-A
Rango: -50°C a 120°C (-58 °F a 248°F)
Resolución: 0.1 °C (32.18 °F)

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO CALIBRADO

Nombre: RTD PT100 Etiqueta: VALORPatrón
Marca: Omega
Modelo: RTDM12-1/8NPT-3MM-24MM-A
Rango: -50°C a 120°C (-58 °F a 248°F)
Resolución: 0.1 °C (32.18 °F)

MÉTODO

En un horno de temperatura que funciona pasando corriente eléctrica a través de un circuito de resistores estaremos transmitiendo la energía calorífica por efecto Joule a una pieza de aluminio que será controlada con un lazo de control PID (Proporcional integral derivador), colocando la temperatura deseada; con los sensores a calibrar serán introducidos en el material, que una vez llegando al valor indicado se esperará un tiempo de estabilización de 10[min], para tomar los cálculos correspondientes, realizando este procedimiento durante 3 interacciones.

RESPONSABLES DE LA CALIBRACIÓN

Ing. Daniel Abraham González Orellana
Brayan González Hernández

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

Valor patrón [°C]	Indicación instrumento bajo calibración. Interacción 1 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración. Interacción 2 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración. Interacción 3 [°C]	Valor Leído Promedio [°C]
45	44.5	44.7	44.30	44.5
60	59.6	59.7	59.7	59.7
100	100.5	99.8	99.5	99.9

Valor patrón [°C]	Porcentaje error de exactitud [%]	Porcentaje Exactitud [%]	Porcentaje error de precisión [%]	Porcentaje de precisión [%]	Incertidumbre [°C]	Valor más representativo con su incertidumbre [°C]	Precisión de rango normal entre -20 °C y 60 °C
45	1.1	98.9	0.4	99.6	0.12	44.3±0.12	±1°C
60	0.6	99.4	0.1	99.9	0.03	59.6±0.03	±1°C
100	0.1	99.9	0.4	99.6	0.30	99.5±0.30	±1°C

EXPRESIONES MATEMÁTICAS

$$\%EE = \frac{|V_p - \bar{V}|}{V_p} \times 100 \quad \%E = 100 - \%EE \quad \Delta V = S_{mv} = \frac{\pm S_y}{\sqrt{n}}$$

$$\%EP = \frac{|V_L - V_A|}{V_L} \times 100 \quad \%P = 100 - \%EP \quad S_y = \pm \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

Comentarios: Después de realizar dicha prueba, se determinó que el instrumento cumple con los criterios de precisión requeridos y, por lo tanto, está apto para su uso.

CONDICIONES DE CALIBRACIÓN

Temperatura ambiente: 28°C
Fecha de validación: 3/03/23

Ing. Daniel Abraham González Orellana

Brayan González Hernández

José Manuel Sánchez Espinosa

LUGAR DE CALIBRACIÓN

Torre de Ingeniería, 8° Piso, Ala Sur
Instituto de Ingeniería, laboratorio de desalación y energías alternativas.
Universidad Nacional Autónoma de México,
Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, México, D.F.

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO A CALIBRAR

Nombre: RTD PT100 Etiqueta: TT0405
Marca: OMEGA
Modelo: RTD-2-F3105-1M-T
Rango: -50°C a 200°C (-58 °F a 392°F)
Resolución: 0.1 °C (32.18 °F)

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO CALIBRADO

Nombre: RTD PT100 Etiqueta: VALOR PATRÓN
Marca: Omega
Modelo: RTDM12-1/8NPT-3MM-24MM-A
Rango: -50°C a 120°C (-58 °F a 248°F)
Resolución: 0.1 °C (32.18 °F)

MÉTODO

En un horno de temperatura que funciona pasando corriente eléctrica a través de un circuito de resistores estaremos transmitiendo la energía calorífica por efecto Joule a una pieza de aluminio que será controlada con un lazo de control PID (Proporcional integral derivador), colocando la temperatura deseada; con los sensores a calibrar serán introducidos en el material, que una vez llegando al valor indicado se esperará un tiempo de estabilización de 10[*min*], para tomar los cálculos correspondientes, realizando este procedimiento durante 3 interacciones.

RESPONSABLES DE LA CALIBRACIÓN

Ing. Daniel Abraham González Orellana
Bryan González Hernández

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

Valor patrón [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 1 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 2 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 3 [°C]	Valor Leído Promedio [°C]
45	44.40	44.20	44.70	44.4
60	59.20	59.10	59.20	59.2
100	100.10	101.20	100.70	100.7

Valor patrón [°C]	Porcentaje error de exactitud [%]	Porcentaje Exactitud [%]	Porcentaje error de precisión [%]	Porcentaje de precisión [%]	Incertidumbre [°C]	Valor más representativo con su incertidumbre [°C]	Precisión de rango normal entre -20 °C y 60 °C
45	1.26	98.74	0.53	99.47	0.15	44.20 ± 0.15	±1°C
60	1.39	98.61	0.11	99.89	0.03	59.10 ± 0.03	±1°C
100	0.67	99.33	0.53	99.47	0.32	101.20 ± 0.32	±1°C

EXPRESIONES MATEMÁTICAS

$$\%EE = \frac{|V_p - \bar{V}|}{V_p} \times 100 \quad \%E = 100 - \%EE \quad \Delta V = S_{mv} = \frac{\pm S_y}{\sqrt{n}}$$

$$\%EP = \frac{|V_L - V_{La}|}{V_L} \times 100 \quad \%P = 100 - \%EP \quad S_y = \pm \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

Comentarios: Después de realizar dicha prueba, se determinó que el instrumento cumple con los criterios de precisión requeridos y, por lo tanto, está apto para su uso.

CONDICIONES DE CALIBRACIÓN

Temperatura ambiente: 28°C
Fecha de validación: 3/03/23

Ing. Daniel Abraham González Orellana

Bryan González Hernández

José Manuel Sánchez Espinosa

LUGAR DE CALIBRACIÓN

Torre de Ingeniería, 8° Piso, Ala Sur
Instituto de Ingeniería, laboratorio de desalación y energías alternativas.
Universidad Nacional Autónoma de México,
Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, México, D.F.

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO A CALIBRAR

Nombre: RTD PT100 Etiqueta: TT0506
Marca: OMEGA
Modelo: RTDM12-1/8NPT-3MM-24MM-A
Rango: -50°C a 120°C (-58 °F a 248°F)
Resolución: 0.1 °C (32.18 °F)

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO CALIBRADO

Nombre: RTD PT100 Etiqueta: VALOR_PAIRÓN
Marca: Omega
Modelo: RTDM12-1/8NPT-3MM-24MM-A
Rango: -50°C a 120°C (-58 °F a 248°F)
Resolución: 0.1 °C (32.18 °F)

MÉTODO

En un horno de temperatura que funciona pasando corriente eléctrica a través de un circuito de resistores estaremos transmitiendo la energía calorífica por efecto Joule a una pieza de aluminio que será controlada con un lazo de control PID (Proporcional integral derivador), colocando la temperatura deseada; con los sensores a calibrar serán introducidos en el material, que una vez llegando al valor indicado se esperará un tiempo de estabilización de 10[*min*], para tomar los cálculos correspondientes, realizando este procedimiento durante 3 interacciones.

RESPONSABLES DE LA CALIBRACIÓN

Ing. Daniel Abraham González Orellana
Brayan González Hernández

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

Valor patrón [°C]	Indicación instrumento bajo calibración. Interacción 1 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración. Interacción 2 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración. Interacción 3 [°C]	Valor Leído Promedio [°C]
45	44.5	44.3	44.30	44.4
60	59.2	58.6	58.7	58.8
100	100.5	99.8	97.5	99.3

Valor patrón [°C]	Porcentaje error de exactitud [%]	Porcentaje Exactitud [%]	Porcentaje error de precisión [%]	Porcentaje de precisión [%]	Incertidumbre [°C]	Valor más representativo con su incertidumbre [°C]	Precisión de rango normal entre -20 °C y 60 °C
45	1.4	98.6	0.2	99.8	0.07	44.3±0.07	±1°C
60	1.9	98.1	0.4	99.6	0.19	58.6±0.19	±1°C
100	0.7	99.3	1.8	98.2	0.91	97.5±0.91	±1°C

EXPRESIONES MATEMÁTICAS

$$\%EE = \frac{|V_p - \bar{V}|}{V_p} \times 100 \quad \%E = 100 - \%EE \quad \Delta V = S_{mv} = \frac{\pm S_y}{\sqrt{n}}$$

$$\%EP = \frac{|V_L - V_A|}{V_L} \times 100 \quad \%P = 100 - \%EP \quad S_y = \pm \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

Comentarios: Después de realizar dicha prueba, se determinó que el instrumento cumple con los criterios de precisión requeridos y, por lo tanto, está apto para su uso.

CONDICIONES DE CALIBRACIÓN

Temperatura ambiente: 28°C
Fecha de validación: 3/03/23

Ing. Daniel Abraham González Orellana

Brayan González Hernández

José Manuel Sánchez Espinosa

LUGAR DE CALIBRACIÓN

Torre de Ingeniería, 8° Piso, Ala Sur
Instituto de Ingeniería, laboratorio de desalación y energías alternas.
Universidad Nacional Autónoma de México,
Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, México, D.F.

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO A CALIBRAR

Nombre: Indicador de Temperatura Etiqueta: TI0102
Marca: DEWIT
Modelo: BMP
Rango: 0°C a 200°C (32 °F a 392°F)
Resolución: 2 °C (32.18 °F)

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO CALIBRADO

Nombre: RTD PT100 Etiqueta: VALOR PATRÓN
Marca: Omega
Modelo: RTDM12-1/8NPT-3MM-24MM-A
Rango: -50°C a 120°C (-58 °F a 248°F)
Resolución: 0.1 °C (32.18 °F)

MÉTODO

En un horno de temperatura que funciona pasando corriente eléctrica a través de un circuito de resistores estaremos transmitiendo la energía calorífica por efecto Joule a una pieza de aluminio que será controlada con un lazo de control PID (Proporcional integral derivador), colocando la temperatura deseada; con los sensores a calibrar serán introducidos en el material, que una vez llegando al valor indicado se esperará un tiempo de estabilización de 10[min], para tomar los cálculos correspondientes, realizando este procedimiento durante 3 interacciones.

RESPONSABLES DE LA CALIBRACIÓN

Ing. Daniel Abraham González Orellana
Brayan González Hernández

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

Valor patrón [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 1 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 2 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 3 [°C]	Valor Leído Promedio [°C]
45	45.00	45.00	45.00	45.0
60	60.00	60.00	60.00	60.0
100	100.00	100.00	100.00	100.0

Valor patrón [°C]	Porcentaje error de exactitud [%]	Porcentaje Exactitud [%]	Porcentaje error de precisión [%]	Porcentaje de precisión [%]	Incertidumbre [°C]	Valor más representativo con su incertidumbre [°C]	Precisión ±2% del rango total [°C]
45	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	45±0	±4°C
60	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	60±0	±4°C
100	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100±0	±4°C

EXPRESIONES MATEMÁTICAS

$$\%EE = \left| \frac{V_p - \bar{V}_p}{V_p} \right| \times 100 \quad \%E = 100 - \%EE \quad \Delta V = S_{mv} = \frac{\pm S_y}{\sqrt{n}}$$

$$\%EP = \left| \frac{V_L - V_{La}}{V_L} \right| \times 100 \quad \%P = 100 - \%EP \quad S_y = \pm \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

Comentarios: Después de realizar dicha prueba, se determinó que el instrumento cumple con los criterios de precisión requeridos y, por lo tanto, está apto para su uso.

CONDICIONES DE CALIBRACIÓN

Temperatura ambiente: 28°C
Fecha de validación: 3/03/23

Ing. Daniel Abraham González Orellana

Brayan González Hernández

José Manuel Sánchez Espinosa

LUGAR DE CALIBRACIÓN

Torre de Ingeniería, 8° Piso, Ala Sur
Instituto de Ingeniería, laboratorio de desalación y energías alternas.
Universidad Nacional Autónoma de México,
Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, México, D.F.

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO A CALIBRAR

Nombre: Indicador de Temperatura Etiqueta: TI0202
Marca: DEWIT
Modelo: BMP
Rango: 0°C a 150°C (32 °F a 300°F)
Resolución: 2 °C (32.18 °F)

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO CALIBRADO

Nombre: RTD PT100 Etiqueta: VALOR PATRÓN
Marca: Omega
Modelo: RTDM12-1/8NPT-3MM-24MM-A
Rango: -50°C a 120°C (-58 °F a 248°F)
Resolución: 0.1 °C (32.18 °F)

MÉTODO

En un horno de temperatura que funciona pasando corriente eléctrica a través de un circuito de resistores estaremos transmitiendo la energía calorífica por efecto Joule a una pieza de aluminio que será controlada con un lazo de control PID (Proporcional integral derivador), colocando la temperatura deseada; con los sensores a calibrar serán introducidos en el material, que una vez llegando al valor indicado se esperará un tiempo de estabilización de 10[min], para tomar los cálculos correspondientes, realizando este procedimiento durante 3 interacciones.

RESPONSABLES DE LA CALIBRACIÓN

Ing. Daniel Abraham González Orellana
Brayan González Hernández

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

Valor patrón [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 1 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 2 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 3 [°C]	Valor Leído Promedio [°C]
45	45.00	45.00	45.00	45.0
60	60.00	60.00	60.00	60.0
100	100.00	100.00	100.00	100.0

Valor patrón [°C]	Porcentaje error de exactitud [%]	Porcentaje Exactitud [%]	Porcentaje error de precisión [%]	Porcentaje de precisión [%]	Incertidumbre [°C]	Valor más representativo con su incertidumbre [°C]	Precisión ±2% del rango total [°C]
45	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	45±0	±3°C
60	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	60±0	±3°C
100	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100±0	±3°C

EXPRESIONES MATEMÁTICAS

$$\%EE = \left| \frac{V_p - \bar{V}_p}{V_p} \right| \times 100 \quad \%E = 100 - \%EE \quad \Delta V = S_{mv} = \frac{\pm S_y}{\sqrt{n}}$$

$$\%EP = \left| \frac{V_L - V_{La}}{V_L} \right| \times 100 \quad \%P = 100 - \%EP \quad S_y = \pm \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

Comentarios: Después de realizar dicha prueba, se determinó que el instrumento cumple con los criterios de precisión requeridos y, por lo tanto, está apto para su uso.

CONDICIONES DE CALIBRACIÓN

Temperatura ambiente: 28°C
Fecha de validación: 3/03/23

Ing. Daniel Abraham González Orellana

Brayan González Hernández

José Manuel Sánchez Espinosa

LUGAR DE CALIBRACIÓN

Torre de Ingeniería, 8° Piso, Ala Sur
Instituto de Ingeniería, laboratorio de desalación y energías alternativas.
Universidad Nacional Autónoma de México,
Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, México, D.F.

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO A CALIBRAR

Nombre: Indicador de Temperatura Etiqueta: TI0403
Marca: EUROSIN
Modelo: BM76
Rango: 0°C a 200°C (32 °F a 392°F)
Resolución: 2 °C (32.18 °F)

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO CALIBRADO

Nombre: RTD PT100 Etiqueta: VALOR PATRÓN
Marca: Omega
Modelo: RTDM12-1/8NPT-3MM-24MM-A
Rango: -50°C a 120°C (-58 °F a 248°F)
Resolución: 0.1 °C (32.18 °F)

MÉTODO

En un horno de temperatura que funciona pasando corriente eléctrica a través de un circuito de resistores estaremos transmitiendo la energía calorífica por efecto Joule a una pieza de aluminio que será controlada con un lazo de control PID (Proporcional integral derivador), colocando la temperatura deseada; con los sensores a calibrar serán introducidos en el material, que una vez llegando al valor indicado se esperará un tiempo de estabilización de 10[min], para tomar los cálculos correspondientes, realizando este procedimiento durante 3 interacciones.

RESPONSABLES DE LA CALIBRACIÓN

Ing. Daniel Abraham González Orellana
Brayan González-Hernández

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

Valor patrón [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 1 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 2 [°C]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 3 [°C]	Valor Leído Promedio [°C]
45	46.00	46.00	46.00	46.0
60	60.00	60.00	60.00	60.0
100	100.00	100.00	100.00	100.0

Valor patrón [°C]	Porcentaje error de exactitud [%]	Porcentaje Exactitud [%]	Porcentaje error de precisión [%]	Porcentaje de precisión [%]	Incertidumbre [°C]	Valor más representativo con su incertidumbre [°C]	Precisión ±1% del rango total [°C]
45	2.22	97.78	0.00	100.00	0.00	46±0	±2°C
60	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	60±0	±2°C
100	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100±0	±2°C

EXPRESIONES MATEMÁTICAS

$$\%EE = \left| \frac{V_p - \bar{V}_p}{V_p} \right| \times 100 \quad \%E = 100 - \%EE \quad \Delta V = S_{mv} = \frac{\pm S_y}{\sqrt{n}}$$

$$\%EP = \left| \frac{V_L - V_{La}}{V_L} \right| \times 100 \quad \%P = 100 - \%EP \quad S_y = \pm \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

Comentarios: Después de realizar dicha prueba, se determinó que el instrumento cumple con los criterios de precisión requeridos y, por lo tanto, está apto para su uso.

CONDICIONES DE CALIBRACIÓN

Temperatura ambiente: 28°C
Fecha de validación: 3/03/23




Ing. Daniel Abraham González Orellana

Brayan González Hernández

José Manuel Sánchez Espinosa

7.6. Hojas de calibración de sensores de presión

LUGAR DE CALIBRACIÓN
Torre de Ingeniería, 8° Piso, Ala Sur Instituto de Ingeniería, laboratorio de desalación y energías alternas. Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, México, D.F.
IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO A CALIBRAR
Nombre: Transmisores de Presión Etiqueta: PT0201 Marca: OMEGA Modelo: PX119-100AI Rango: 0 [psi] a 100 [psi] (0 [bar] a 7 [bar]) Resolución: 0.1 [psi] (0.06 [bar])
IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO CALIBRADO
Nombre: Bomba manual de presión Marca: Omega Modelo: HPP-600 Rango: 0 [psi] a 600 [psi] (0 [bar] a 41 [bar]) Resolución: 0.1 [psi] (0.06 [bar])
MÉTODO
Se utilizará una bomba calibradora manual de presión con la cual se fijará un valor de presión de referencia en 4 diferentes niveles, utilizando las unidades de presión asignadas, realizando 3 iteraciones. El procedimiento será presurizar al primer punto con el sensor patrón, al llegar al valor con un error de 0, se dará un tiempo de estabilización de 10 [s], posteriormente se tomará el valor del sensor a calibrar para registrarlo en la hoja de datos.
RESPONSABLES DE LA CALIBRACIÓN
 Ing. Daniel Abraham González Orellana  Bryan González Hernández

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN							
Valor patrón [psi]	Indicación instrumento bajo calibración Iteración 1 [psi]	Indicación instrumento bajo calibración Iteración 2 [psi]	Indicación instrumento bajo calibración Iteración 3 [psi]	Valor Leído Promedio [psi]			
20	19	19	20	19.33			
40	40	41	40	40.33			
60	59	61	61	60.33			
80	82	81	81	81.33			
Valor patrón [psi]	Porcentaje error de exactitud [%]	Porcentaje Exactitud [%]	Porcentaje error de precisión [%]	Porcentaje de precisión [%]	Incertidumbre [psi]	Valor más representativo con su incertidumbre [psi]	Precisión de 0.2% respecto al valor máximo [PSI]
20	0.03	99.97	1.72	98.28	0.33	19±0.33	±0.2
40	0.01	99.99	1.65	98.35	0.33	40±0.33	±0.2
60	0.01	99.99	1.10	98.90	0.67	61±0.67	±0.2
80	0.02	99.98	0.82	99.18	0.33	82±0.33	±0.2
EXPRESIONES MATEMÁTICAS							
$\%EE = \frac{ V_p - V_r }{V_r} \times 100$		$\%E = 100 - \%EE$		$\Delta V = S_{av} = \frac{\pm S_v}{\sqrt{n}}$			
$\%EP = \frac{ V_i - V_r }{V_r} \times 100$		$\%P = 100 - \%EP$		$S_v = \pm \left[\frac{\sum_{j=1}^n (V_i - V_j)^2}{n-1} \right]^{1/2}$			
Comentarios: Después de realizar dicha prueba, se determinó que el instrumento cumple con los criterios de precisión requeridos y, por lo tanto, está apto para su uso.							
CONDICIONES DE CALIBRACIÓN							
Temperatura ambiente: 28°C							
Fecha de validación: 3/03/23							
 Ing. Daniel Abraham González Orellana		 José Manuel Sánchez Espinosa		 Bryan González Hernández			

LUGAR DE CALIBRACIÓN

Torre de Ingeniería, 8° Piso, Ala Sur
Instituto de Ingeniería, laboratorio de desalación y energías alternativas.
Universidad Nacional Autónoma de México,
Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, México, D.F.

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO A CALIBRAR

Nombre: Transmisores de Presión Etiqueta: PT0202
Marca: OMEGA
Modelo: PX119-100AI
Rango: 0 [psi] a 100 [psi] (0 [bar] a 7 [bar])
Resolución: 0.1 [psi] (0.06 [bar])

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO CALIBRADO

Nombre: Bomba manual de presión
Marca: Omega
Modelo: IIPP-600
Rango: 0 [psi] a 600 [psi] (0 [bar] a 41 [bar])
Resolución: 0.1 [psi] (0.06 [bar])

MÉTODO

Se utilizará una bomba calibradora manual de presión con la cual se fijará un valor de presión de referencia en 4 diferentes niveles, utilizando las unidades de presión asignadas, realizando 3 iteraciones. El procedimiento será presurizar al primer punto con el sensor patrón, al llegar al valor con un error de 0, se dará un tiempo de estabilización de 10 [s], posteriormente se tomará el valor del sensor a calibrar para registrarlo en la hoja de datos.

RESPONSABLES DE LA CALIBRACIÓN

Ing. Daniel Abraham González Orellana
Brayan González Hernández

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

Valor patrón [psi]	Indicación instrumento bajo calibración Iteración 1 [psi]	Indicación instrumento bajo calibración Iteración 2 [psi]	Indicación instrumento bajo calibración Iteración 3 [psi]	Valor Leído Promedio [psi]
20	20	19	20	19.67
40	40	41	40	40.33
60	60	60	61	60.33
80	80	81	81	80.67

Valor patrón [psi]	Porcentaje error de exactitud [%]	Porcentaje Exactitud [%]	Porcentaje error de precisión [%]	Porcentaje de precisión [%]	Incertidumbre [psi]	Valor más representativo con su incertidumbre [psi]	Precisión de 0.2% respecto al valor máximo [PSI]
20	0.02	99.98	3.39	96.61	0.33	19±0.33	±0.2
40	0.01	99.99	1.65	98.35	0.33	41±0.33	±0.2
60	0.01	99.99	0.55	99.45	0.33	61±0.33	±0.2
80	0.01	99.99	0.83	99.17	0.33	81±0.33	±0.2

EXPRESIONES MATEMÁTICAS

$$\%EE = \left| \frac{V_p - V_i}{V_p} \right| \times 100 \quad \%E = 100 - \%EE \quad \Delta V = S_{mv} = \frac{\pm S_v}{\sqrt{n}}$$

$$\%EP = \left| \frac{V_i - V_a}{V_i} \right| \times 100 \quad \%P = 100 - \%EP \quad S_v = \pm \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

Comentarios: Después de realizar dicha prueba, se determinó que el instrumento cumple con los criterios de precisión requeridos y, por lo tanto, está apto para su uso.

CONDICIONES DE CALIBRACIÓN

Temperatura ambiente: 28°C
Fecha de validación: 3/03/23

Ing. Daniel Abraham González Orellana

Brayan González Hernández

José Manuel Sánchez Espinosa

LUGAR DE CALIBRACIÓN

Torre de Ingeniería, 8° Piso, Ala Sur
 Instituto de Ingeniería, laboratorio de desalación y energías alternativas.
 Universidad Nacional Autónoma de México,
 Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, México, D.F.

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO A CALIBRAR

Nombre: Transmisores de Presión Etiqueta: PT0203
 Marca: SDI_PROPENSE
 Modelo: SPID25-20-1000H
 Rango: 0 [psi] a 1000 [psi] (0 [bar] a 68 [bar])
 Resolución: 0.1 [psi] (0.06 [bar])

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO CALIBRADO

Nombre: Bomba manual de presión
 Marca: Omega
 Modelo: IIPP-600
 Rango: 0 [psi] a 600 [psi] (0 [bar] a 41 [bar])
 Resolución: 0.1 [psi] (0.06 [bar])

MÉTODO

Se utilizará una bomba calibradora manual de presión con la cual se fijará un valor de presión de referencia en 4 diferentes niveles, utilizando las unidades de presión asignadas, realizando 3 iteraciones. El procedimiento será presurizar al primer punto con el sensor patrón, al llegar al valor con un error de 0, se dará un tiempo de estabilización de 10 [s], posteriormente se tomará el valor del sensor a calibrar para registrarlo en la hoja de datos.

RESPONSABLES DE LA CALIBRACIÓN

Ing. Daniel Abraham González Orellana
 Brayan González Hernández

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

Valor patrón [psi]	Indicación instrumento bajo calibración Iteración 1 [psi]	Indicación instrumento bajo calibración Iteración 2 [psi]	Indicación instrumento bajo calibración Iteración 3 [psi]	Valor Leído Promedio [psi]
114	116	115	116	115.67
250	253	254	253	253.33
410	413	412	412	412.33
500	502	502	502	502.00

Valor patrón [psi]	Porcentaje error de exactitud [%]	Porcentaje Exactitud [%]	Porcentaje error de precisión [%]	Porcentaje de precisión [%]	Incertidumbre [psi]	Valor más representativo con su incertidumbre [psi]	Precisión de 0.2% respecto al valor máximo [PSI]
114	0.01	99.99	0.29	99.71	0.33	116±0.33	±2
250	0.01	99.99	0.13	99.87	0.33	254±0.33	±2
410	0.01	99.99	0.16	99.84	0.33	413±0.33	±2
500	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	502±0	±2

EXPRESIONES MATEMÁTICAS

$$\%EE = \frac{|V_p - V_i|}{V_p} \times 100 \quad \%E = 100 - \%EE \quad \Delta V = S_{mv} = \frac{\pm S_v}{\sqrt{n}}$$

$$\%EP = \frac{|V_i - V_a|}{V_i} \times 100 \quad \%P = 100 - \%EP \quad S_v = \pm \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

Comentarios: Después de realizar dicha prueba, se determinó que el instrumento cumple con los criterios de precisión requeridos y, por lo tanto, está apto para su uso.

CONDICIONES DE CALIBRACIÓN

Temperatura ambiente: 28°C
 Fecha de validación: 3/03/23

Ing. Daniel Abraham González Orellana

Brayan González Hernández

José Manuel Sánchez Espinosa

LUGAR DE CALIBRACIÓN

Torre de Ingeniería, 8° Piso, Ala Sur
Instituto de Ingeniería, laboratorio de desalación y energías alternas.
Universidad Nacional Autónoma de México,
Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, México, D.F.

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO A CALIBRAR

Nombre: Transmisores de Presión Etiqueta: PT0404
Marca: SDI_PROPENSE
Modelo: SPID25-20-1000H
Rango: 0 [psi] a 1000 [psi] (0 [bar] a 68 [bar])
Resolución: 0.1 [psi] (0.06 [bar])

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO CALIBRADO

Nombre: Bomba manual de presión
Marca: Omega
Modelo: IIPP-600
Rango: 0 [psi] a 600 [psi] (0 [bar] a 41 [bar])
Resolución: 0.1 [psi] (0.06 [bar])

MÉTODO

Se utilizará una bomba calibradora manual de presión con la cual se fijará un valor de presión de referencia en 4 diferentes niveles, utilizando las unidades de presión asignadas, realizando 3 iteraciones. El procedimiento será presurizar al primer punto con el sensor patrón, al llegar al valor con un error de 0, se dará un tiempo de estabilización de 10 [s], posteriormente se tomará el valor del sensor a calibrar para registrarlo en la hoja de datos.

RESPONSABLES DE LA CALIBRACIÓN

Ing. Daniel Abraham González Orellana
Brayan González Hernández

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

Valor patrón [psi]	Indicación instrumento bajo calibración Iteración 1 [psi]	Indicación instrumento bajo calibración Iteración 2 [psi]	Indicación instrumento bajo calibración Iteración 3 [psi]	Valor Leído Promedio [psi]
107	109	108	109	108.67
220	223	222	223	222.67
310	313	311	311	311.67
450	452	453	453	452.67

Valor patrón [psi]	Porcentaje error de exactitud [%]	Porcentaje Exactitud [%]	Porcentaje error de precisión [%]	Porcentaje de precisión [%]	Incertidumbre [psi]	Valor más representativo con su incertidumbre [psi]	Precisión de 0.2% respecto al valor máximo [PSI]
107	0.02	99.98	0.31	99.69	0.33	109±0.33	±2
220	0.01	99.99	0.15	99.85	0.33	223±0.33	±2
310	0.01	99.99	0.43	99.57	0.67	313±0.67	±2
450	0.01	99.99	0.07	99.93	0.33	453±0.33	±2

EXPRESIONES MATEMÁTICAS

$$\%EE = \frac{|V_p - V_a|}{V_p} \times 100 \quad \%E = 100 - \%EE \quad \Delta V = S_{mv} = \frac{\pm S_v}{\sqrt{n}}$$

$$\%EP = \frac{|V_L - V_a|}{V_L} \times 100 \quad \%P = 100 - \%EP \quad S_v = \pm \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

Comentarios: Después de realizar dicha prueba, se determinó que el instrumento cumple con los criterios de precisión requeridos y, por lo tanto, está apto para su uso.

CONDICIONES DE CALIBRACIÓN

Temperatura ambiente: 28°C
Fecha de validación: 3/03/23

Ing. Daniel Abraham González Orellana

Brayan González Hernández

José Manuel Sánchez Espinosa

LUGAR DE CALIBRACIÓN

Torre de Ingeniería, 8° Piso, Ala Sur
 Instituto de Ingeniería, laboratorio de desalación y energías alternas.
 Universidad Nacional Autónoma de México,
 Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, México, D.F.

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO A CALIBRAR

Nombre: Indicadores de Presión Etiqueta: PI0401
 Marca: WINTERS
 Modelo: PFQ-ZR
 Rango: 0 [psi] a 60 [psi] (0 [bar] a 4 [bar])
 Resolución: 1 [psi] (0.06 [bar])

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO CALIBRADO

Nombre: Bomba manual de presión
 Marca: Omega
 Modelo: HPP-600
 Rango: 0 [psi] a 600 [psi] (0 [bar] a 41 [bar])
 Resolución: 0.1 [psi] (0.06 [bar])

MÉTODO

Se utilizará una bomba calibradora manual de presión con la cual se fijará un valor de presión de referencia en 4 diferentes niveles, utilizando las unidades de presión asignadas, realizando 3 iteraciones. El procedimiento será presurizar al primer punto con el sensor patrón, al llegar al valor con un error de 0, se dará un tiempo de estabilización de 10 [s], posteriormente se tomará el valor del sensor a calibrar para registrarlo en la hoja de datos.

RESPONSABLES DE LA CALIBRACIÓN

Ing. Daniel Abraham González Orellana
 Brayan González Hernández

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

Valor patrón [psi]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 1 [psi]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 2 [psi]	Indicación instrumento bajo calibración Interacción 3 [psi]	Valor Leído Promedio [psi]
10	11	11	11	11.00
20	21	21	20	20.67
30	30	31	30	30.33
40	40	41	40	40.33

Valor patrón [psi]	Porcentaje error de exactitud [%]	Porcentaje Exactitud [%]	Porcentaje error de precisión [%]	Porcentaje de precisión [%]	Incertidumbre [psi]	Valor más representativo con su incertidumbre [psi]	Precisión de ±1% respecto al valor máximo [PSI]
10	0.10	99.90	0.00	100.00	0.00	11±0	±0.6
20	0.03	99.97	1.61	98.39	0.33	41±0.33	±0.6
30	0.01	99.99	2.20	97.80	0.33	61±0.33	±0.6
40	0.01	99.99	1.65	98.35	0.33	81±0.33	±0.6

EXPRESIONES MATEMÁTICAS

$$\%EE = \left| \frac{V_p - V_a}{V_p} \right| \times 100 \quad \%E = 100 - \%EE \quad \Delta V = S_{mv} = \frac{\pm 5V}{\sqrt{n}}$$

$$\%EP = \left| \frac{V_L - V_a}{V_L} \right| \times 100 \quad \%P = 100 - \%EP \quad S_V = \pm \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

Comentarios: Después de realizar dicha prueba, se determinó que el instrumento cumple con los criterios de precisión requeridos y, por lo tanto, está apto para su uso.

CONDICIONES DE CALIBRACIÓN

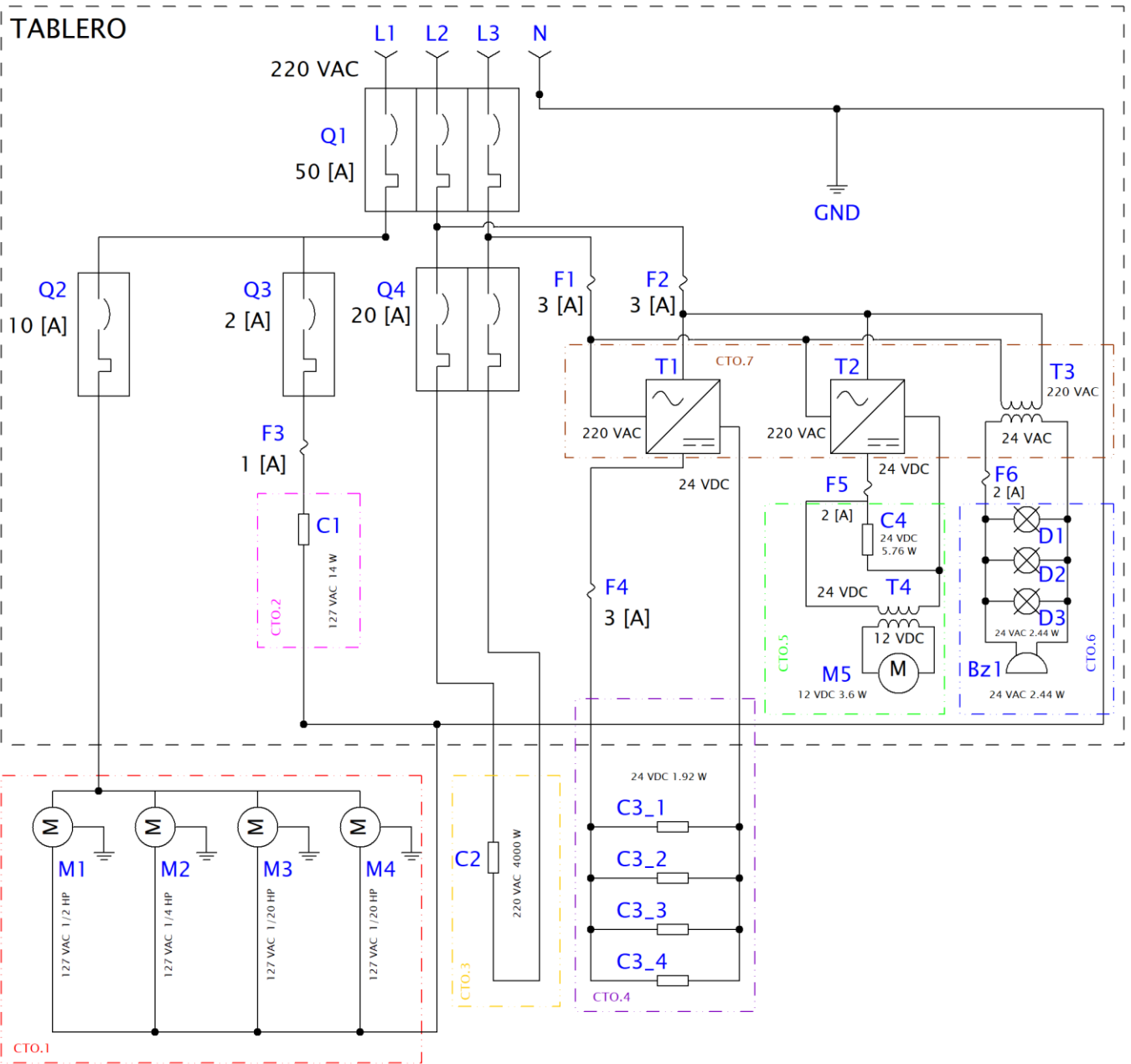
Temperatura ambiente: 28°C
 Fecha de validación: 3/03/23

Ing. Daniel Abraham González Orellana

Brayan González Hernández

José Manuel Sánchez Espinosa

7.7. Diagrama trifilar eléctrico



7.8. Diseño de calibrador de temperatura

En un horno de temperatura que funciona generando energía térmica desde la energía eléctrica en un circuito de resistores que transmiten la energía calorífica a una masa de referencia de aluminio. Esta temperatura será controlada con un lazo de control PID (Proporcional Integral Derivador), colocando la temperatura objetivo (Setpoint); localizados de manera inmediata al sensor de referencia (patrón) estarán los sensores a calibrar que serán acoplados de manera firme en el material. Una vez llegando al valor de Setpoint se tendrá un tiempo de estabilización de 10 min, para tomar las medidas correspondientes, realizando este procedimiento en 3 interacciones.

7.8.1. Cálculos para la creación del circuito del horno

Con base en la fórmula de calor, se deben determinar la potencia requerida para la resistencia que calentará la masa de aluminio, así como el tiempo necesario para alcanzar la temperatura deseada. Para ello, se realizará la calibración de los sensores de temperatura hasta 100 °C.

$Q \rightarrow$ Calor $c_{Al} \rightarrow$ Calor específico del aluminio $T_f \rightarrow$ Temperatura final
 $m \rightarrow$ masa $T_A \rightarrow$ Temperatura ambiente

Datos:

$Q = ?$

$m = 215 \text{ [gr]}$

$T_A = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$

$c_{Al} = 0.896 \left[\frac{\text{J}}{\text{gr}^\circ\text{C}} \right]$

$T_f = 100 \text{ [}^\circ\text{C]}$

$$Q = c_{Al}m(T_f - T_A)$$

$$Q = \left(0.896 \left[\frac{\text{J}}{\text{gr}^\circ\text{C}} \right] \right) (215 \text{ [gr]})(100 - 20) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Q = 15,411.2 \text{ [J]}$$

Una vez se ha determinado la cantidad de calor necesaria para alcanzar una temperatura de 100 °C en nuestra masa, se plantea la selección del voltaje y la corriente adecuados para determinar el tiempo estimado de calentamiento. Además, con estos valores de voltaje y corriente, se calcula el valor de resistencia requerido para el sistema.

$Q \rightarrow \text{Calor}$ $I \rightarrow \text{Corriente}$ $R \rightarrow \text{Resistor}$
 $V \rightarrow \text{Voltaje}$ $t \rightarrow \text{tiempo}$

$$t = \frac{Q}{VI}$$

Datos:

$$Q = 15,411.2[J]$$

$$t = \frac{15,411.2[J]}{(30[V])(2.7[A])}$$

$$t = ?$$

$$V = 30[V]$$

$$t = \mathbf{190.26 [s] = 3.17 [min]}$$

$$I = 2.7 [A]$$

$$R = ?$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{30[V]}{2.7[A]} = \mathbf{11.11 [\Omega]}$$

7.8.2. Diseño del circuito eléctrico

Para la creación del circuito, se requiere utilizar los siguientes componentes: un Mosfet, un opto acoplador y una serie de resistores. Los valores de los resistores son los siguientes: 2.7 [Ω] 25[W], 1k [Ω] 1/2[W], 510 [Ω] 1/2[W] y 100 [Ω] 1/2[W].

Una vez que se tengan todos los componentes, se procede al diseño del circuito en Proteus. En este circuito, el optoacoplador funcionará al recibir una señal PWM, lo cual permitirá controlar la saturación del Mosfet. Dependiendo de las circunstancias, esta saturación puede o no producirse, lo cual a su vez afectará la transferencia de calor hacia la masa de aluminio.

Ilustración 122

Diseño de circuito de horno de temperatura

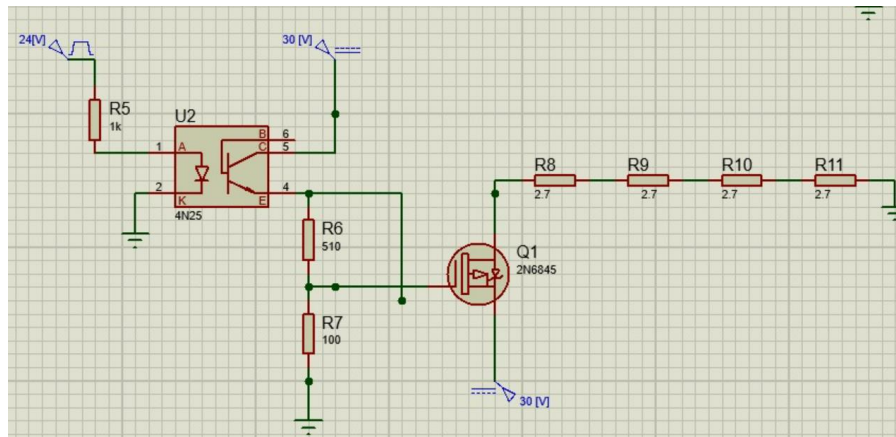
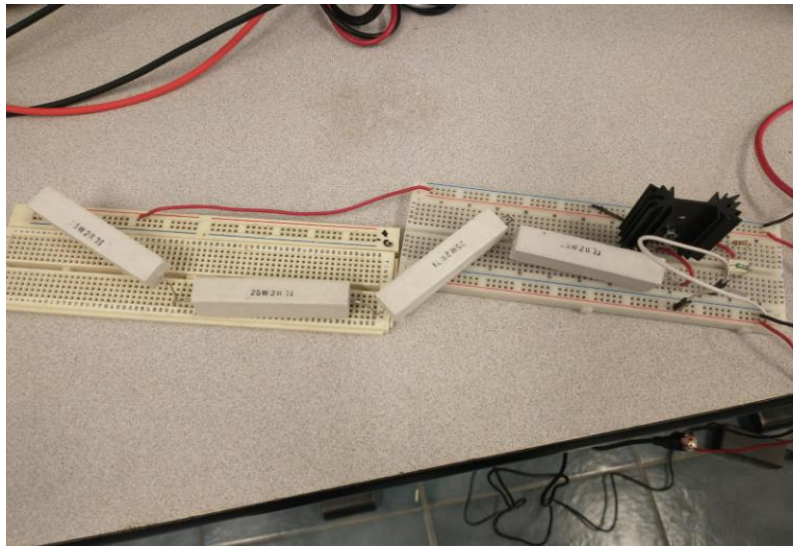


Ilustración 123

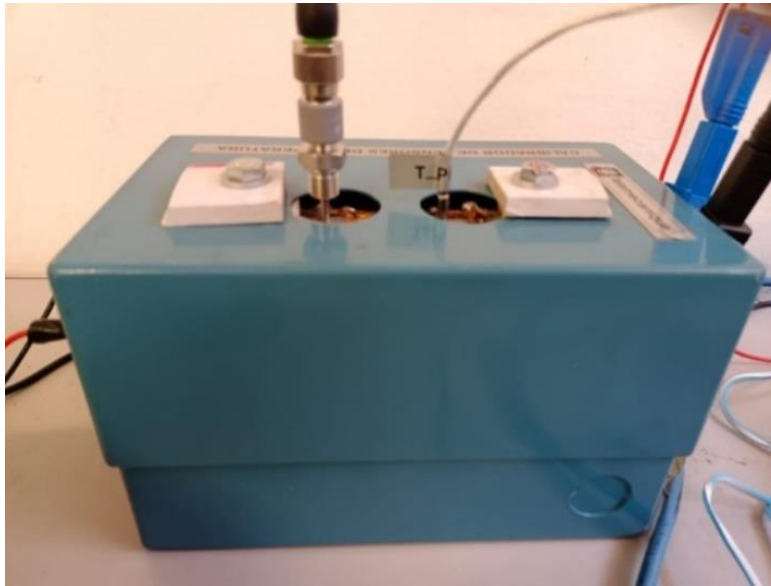
Prueba de circuito ensamblado de protoboard



Por último, una vez que se tiene el diseño completo, se procede a ensamblarlo de manera que quede en perfectas condiciones para controlar la temperatura mediante el PID y realizar las interacciones necesarias.

Ilustración 124

Horno calibrador de sensores de temperatura



7.8.3. Programación de controlador PID

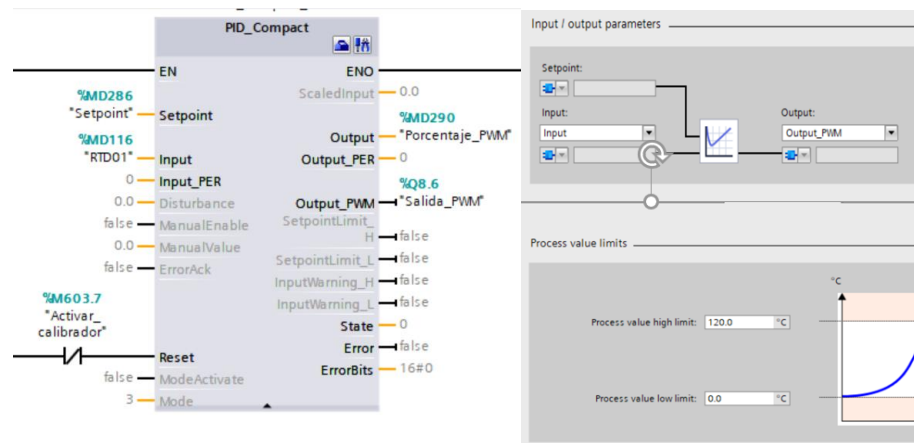
En el PLC Siemens S7-1200, se llevó a cabo la programación del controlador PID. Este controlador ya cuenta con un bloque de programación predefinido en el PLC, por lo que nuestra tarea consistió en configurarlo adecuadamente para realizar el control del horno de temperatura.

Para lograr esto, se deben agregar el bloque PID_Compact en la programación del PLC. En la configuración de este bloque, se especificará que se trata de un controlador de temperatura. Además, se establecerá que la entrada del controlador será una señal analógica, mientras que la salida generará una señal de modulación por ancho de pulso (PWM).

Al configurar correctamente el bloque PID_Compact, se permitirá al controlador PID controlar la temperatura del horno de manera eficiente y precisa. La entrada analógica proporcionará la información necesaria sobre la temperatura actual, mientras que la salida PWM permitirá regular la energía suministrada al horno para mantener la temperatura dentro de los parámetros deseados.

Ilustración 125

Configuración del bloque PID



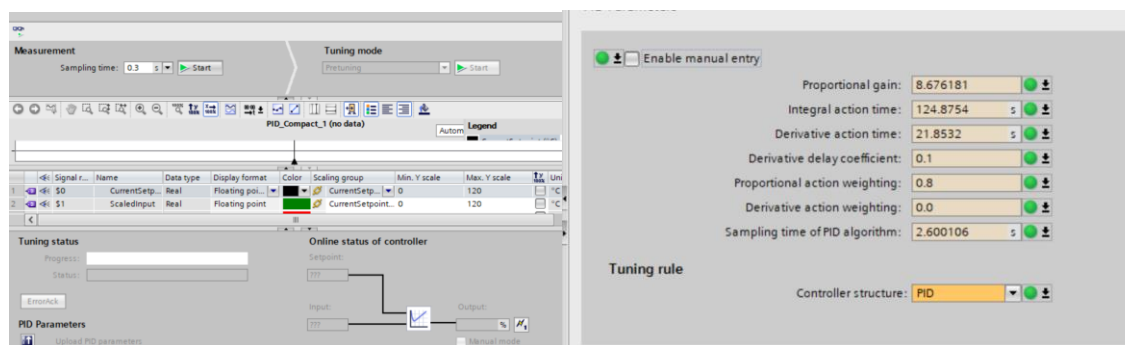
Una vez que la configuración del bloque PID ha sido establecida, se deben proceder a realizar la afinación del controlador. Esta etapa tiene como objetivo adquirir automáticamente las constantes necesarias para el funcionamiento óptimo del controlador.

La afinación del controlador se lleva a cabo mediante el método de sintonía automática. Este método permite obtener de manera precisa las constantes del controlador, como el término proporcional (P), el término integral (I) y el término derivativo (D).

Una vez que se han obtenido las constantes del controlador a través de la afinación, el controlador está listo para ser utilizado en la aplicación.

Ilustración 126

Parámetros del controlador PID del horno de temperatura



The screenshot shows the PID tuning interface. The left panel displays the 'Measurement' section with a 'Sampling time' of 0.3 s and a 'Tuning mode' of 'Retuning'. The right panel shows the 'Tuning rule' section with the following parameters:

- Proportional gain: 8.676181
- Integral action time: 124.8754 s
- Derivative action time: 21.8532 s
- Derivative delay coefficient: 0.1
- Proportional action weighting: 0.8
- Derivative action weighting: 0.0
- Sampling time of PID algorithm: 2.600106 s

The controller structure is set to PID.

7.9. Calibración de sensores de presión

Se utilizará una bomba calibradora manual de presión con la cual se fijará un valor de presión de referencia en 4 diferentes niveles, utilizando las unidades de presión asignadas, realizando 3 iteraciones. El procedimiento será presurizar al primer punto con el sensor patrón, al llegar al valor con un error de 0, se dará un tiempo de estabilización de 10 s, posteriormente se tomará el valor del sensor a calibrar para registrarlo en la hoja de datos.

Ilustración 127

Bomba calibradora de sensores de presión



8. Índice de imágenes

Ilustración 1 Serie de pasos para la elaboración de la cervecería.....	11
Ilustración 2 <i>Capas de la Tierra</i> (Clifford, 2007)	13
Ilustración 3 <i>Representación geográfica de la clasificación geotérmica en el mundo</i> (Hiriart Le Bert, 2008)	14
Ilustración 4 Mapa de Flujo de Calor en México (UNAM, 2018)	16
Ilustración 5 Ciudades de la república mexicana con actividad geotérmica (IIDEA, 2023).....	17
Ilustración 6 Oktoberfest Alemania 2017 (ECA, 2017)	18
Ilustración 7 Colores de Cervezas (Suárez, 2013).....	19
Ilustración 8 <i>Cebada en agua</i> (Artesanal, s.f.)	19
Ilustración 9 Germinación de cebada (Fernández, 2021)	20
Ilustración 10 "Malta verde" en horno de secado (Ultrasonics, 2021)	20
Ilustración 11 Molino de malta (Ferreya, 2018)	21
Ilustración 12 <i>Filtrado de mosto</i> (Cervezero, 2020)	22
Ilustración 13 Malta hervida (Artesanal, s.f.).....	23
Ilustración 14 Fermentadores isobáricos donde contiene el mosto para agregar la levadura (Casera, 2015)	24
Ilustración 15 Material de carbonatación forzada (Pablo, 2020).....	27
Ilustración 16 <i>Volúmenes de CO2 según la temperatura</i> (Pablo, 2020)	27
Ilustración 17 Diagrama de componentes de un lazo de control cerrado	31
Ilustración 18 Termostato (DOMINION, 2022)	32
Ilustración 19 Motor eléctrico (Transelec, 2021)	33
Ilustración 20 Robot manipulador (Sara, 2017)	34
Ilustración 21 Gráfica del proceso del controlador PID (Garcia, 2019).....	35
Ilustración 22 Modelado de recipiente térmico	35
Ilustración 23 Programación de Matlab	37
Ilustración 24 Gráfica de comportamiento de nuestro controlador PID	37
Ilustración 25 Valor de los parámetros K_p , K_i y K_d	38
Ilustración 26 Porcentajes de salida de pulsos (HETPRO, 2015)	38
Ilustración 27 PLC Siemens S7-1200 (Boltronic, 2021).....	41
Ilustración 28 Tipos de las HMI (omron, 2023).....	42
Ilustración 29 Transductor de pt100 a corriente de 4 a 20 mA	44
Ilustración 30 Esquema de un RTD (GSL INDUSTRIAS, 2022).....	44
Ilustración 31 Flujómetro (Zarza, 2021)	46
Ilustración 32 Válvula de control	47
Ilustración 33 Sensor de nivel óptico (Newark, 2021)	49
Ilustración 34 SSR de CD (Automationdirect, 2023).....	50
Ilustración 35 Diagrama de flujo y de proceso (Grupo IIDEA,2023)	53
Ilustración 36 Escritura en DTI de la línea de tuberías	54
Ilustración 37 Escritura en DTI de los equipos	54
Ilustración 38 Escritura en DTI de instrumentación.....	55

Ilustración 39	Simbología de instrumentos en DTI.....	56
Ilustración 40	Diagrama de tuberías e instrumentación	56
Ilustración 41	Esquema de la secuencia de llenado en el DTI	59
Ilustración 42	Esquema de la secuencia de precalentado en el DTI.....	61
Ilustración 43	Esquema de la secuencia de maceración en el DTI.....	61
Ilustración 44	Esquema de la secuencia de hervor en el DTI.....	62
Ilustración 45	Esquema de la secuencia de enfriamiento en el DTI.....	63
Ilustración 46	Hoja de datos de indicadores de presión	66
Ilustración 47	Diagrama trifilar eléctrico	68
Ilustración 48	Ensamble de componentes del tablero de control	74
Ilustración 49	Cableado del tablero de control.....	74
Ilustración 50	Tablero de monitoreo y control.....	75
Ilustración 51	Instalación del sistema de instrumentación y control de la PCG	76
Ilustración 52	Cervecería geotérmica.....	77
Ilustración 53	Bloques de normalización y escala.....	78
Ilustración 54	Programación de transmisores de temperatura.....	79
Ilustración 55	Programación de transmisores de presión	79
Ilustración 56	Diseño de PCB para circuito del flujómetro.....	80
Ilustración 57	Configuraciones del HSC.....	80
Ilustración 58	Configuración de los datos del HSC	81
Ilustración 59	Programación de HSC.....	82
Ilustración 60	Pantalla de monitoreo de señales en HMI	83
Ilustración 61	Pantalla de monitoreo con gráfico en HMI	83
Ilustración 62	Calibración de sensores de temperatura	84
Ilustración 63	Hojas de calibración de sensores de temperatura	85
Ilustración 64	Hojas de calibración de sensores de presión	85
Ilustración 65	Diagrama de secuencia de llenado	87
Ilustración 66	Diagrama de secuencia de precalentamiento.....	88
Ilustración 67	Diagrama de control de la secuencia de maceración.....	89
Ilustración 68	Diagrama de secuencia de hervor.....	90
Ilustración 69	Diagrama de secuencia de enfriamiento.....	91
Ilustración 70	Diagrama de secuencia de limpieza	92
Ilustración 71	Programación de las válvulas FV-02-001 y FC-02-001	94
Ilustración 72	Bloque de programación del llenado del sistema	94
Ilustración 73	Pantalla de llenado del sistema.....	95
Ilustración 74	Diagrama de flujo de la secuencia de llenado	96
Ilustración 75	Programación de función de activar circulación de bomba.....	97
Ilustración 76	Controlador PID de CA-02-001	98
Ilustración 77	Parámetros actualizados del controlador PID	99
Ilustración 78	Programación de indicador led de CA-02-001	99
Ilustración 79	Control de la presión de CA-02-001	100
Ilustración 80	Programación de la función de las alarmas	101

Ilustración 81	Programación del precalentado	102
Ilustración 82	Programación de bomba BA-03-001	103
Ilustración 83	Pantalla de precalentado en HMI	104
Ilustración 84	Diagrama de flujo de la secuencia de precalentado.....	104
Ilustración 85	Programación de cronómetro	105
Ilustración 86	Inicialización de tiempo de maceración	106
Ilustración 87	Programación de maceración	106
Ilustración 88	Programación de transferencia de agua para lavado de mosto	107
Ilustración 89	Pantalla de maceración en HMI	108
Ilustración 90	Diagrama de flujo de la secuencia de maceración.....	108
Ilustración 91	Programación de transferencia de mosto.....	109
Ilustración 92	Inicialización de tiempo de hervor	110
Ilustración 93	Programación de cronómetro de hervor	110
Ilustración 94	Programación de Whirlpool.....	111
Ilustración 95	Inicialización de tiempo de Whirlpool	111
Ilustración 96	Pantalla de hervor.....	112
Ilustración 97	Diagrama de flujo de secuencia de hervor	113
Ilustración 98	Programación de secuencia de enfriamiento	114
Ilustración 99	Pantalla de enfriamiento en HMI	115
Ilustración 100	Diagrama de flujo de secuencia de enfriamiento	115
Ilustración 101	Controlador de CA-02-001 en limpieza	116
Ilustración 102	<i>Programación de alarma de limpieza con ácidos</i>	117
Ilustración 103	Programación de alarma de limpieza con agua	118
Ilustración 104	Inicialización de tiempo de limpieza	118
Ilustración 105	Pantalla de secuencia de limpieza	119
Ilustración 106	Diagrama de flujo de secuencia de limpieza	120
Ilustración 107	Programación de botón de emergencia.....	121
Ilustración 108	Sistema de 3 ollas con una sola bomba	126
Ilustración 109	Ensamble del tablero de control de la PCG.....	127
Ilustración 110	Resultados de la secuencia de llenado.....	128
Ilustración 111	Funcionamiento de pantalla de precalentado	128
Ilustración 112	Funcionamiento del precalentamiento.....	129
Ilustración 113	Funcionamiento de pantalla de maceración	130
Ilustración 114	Funcionamiento de transferencia de agua a una tercera olla	130
Ilustración 115	Transferencia de mosto	131
Ilustración 116	Alarma de hervor.....	131
Ilustración 117	Alarma de Whirlpool.....	132
Ilustración 118	Pantalla de enfriamiento en funcionamiento	133
Ilustración 119	Funcionamiento de la pantalla de limpieza	133
Ilustración 120	Producción de cerveza artesanal	135
Ilustración 121	Equipo de trabajo de cerveza artesanal geotérmica.....	136
Ilustración 122	Diseño de circuito de horno de temperatura.....	172

Ilustración 123 Prueba de circuito ensamblado de protoboard.....	172
Ilustración 124 Horno calibrador de sensores de temperatura	173
Ilustración 125 Configuración del bloque PID.....	174
Ilustración 126 Parámetros del controlador PID del horno de temperatura	174
Ilustración 127 Bomba calibradora de sensores de presión.....	175

9. Índice de tablas

Tabla 1 Lista de instrumentos	57
Tabla 2 Lista de dispositivos de control.....	58
Tabla 3 Lista de señales	58
Tabla 4 Sistema de unidades	63
Tabla 5 Componentes eléctricos	69
Tabla 6 Potencias nominales de equipos eléctricos	70
Tabla 7 Suma de potencias de los equipos eléctricos.....	71
Tabla 8 Resultados obtenidos	121
Tabla 9 Tabla de resultados obtenidos de los documentos de diseño e ingeniería.	124
Tabla 10 BOM de PCG.....	134
Tabla 11 Protección de instrumentos	144