Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Asignatura:

Proyectos de Mecánico-eléctrica (PME)

Ingenieros a cargo de la asignatura:

Ing. Carlos Quispe Chanampa

Ing. Pedro Rotta Saavedra

Tema:

Desarrollo y Simulación de un Gemelo Digital de un Intercambiador de Calor mediante Modelado 3D para la implementación de un mantenimiento preventivo

Integrantes (Grupo 1):

- **Banda Moreno Carlos (Coordinador)**
- **Chunga Shimokawa Diego**
- **Serrepe Castillo Joan**
- **Montero Nuñez Jorge**

Piura-Perú

2024

Lista de Imágenes

Imagen 1: Intercambiador de tubo y coraza (DirectIndustry) 9
Imagen 2: Tapa de la coraza 13
Imagen 3: Coraza del intercambiador 13
Imagen 4: Tubos del intercambiador con sus separaciones 14
Imagen 5: Sistema de bombeo y prueba del intercambiador de calor 14
Imagen 6: Distribución de trabajo en Ansys Workbench 15
Imagen 7: Distribución de sólidos y componentes del modelo CAD del intercambiador de calor 16
Imagen 8: Esquema de intercambiador de calor en Simulink 18
Imagen 9: Núcleo del intercambiador de calor 21
Imagen 10: Carcasa del intercambiador de calor 22
Imagen 11: Vista longitudinal del intercambiador de calor 22
Imagen 12: Parámetros antes mencionados ingresados para la simulación 23
Imagen 13: Contorno de color de temperatura de la entrada de agua caliente 24
Imagen 14: Contorno de color de temperatura de la entrada de agua fría 24
Imagen 15: Contorno de color de temperatura de la salida de agua caliente 25
Imagen 16: Contorno de color de temperatura de la salida de agua fría 25
Imagen 17: Contorno de color de temperatura de la vista longitudinal del intercambiador de calor 26
Imagen 18: Trayectoria del fluido caliente 26
Imagen 19: Trayectoria del fluido frío 27
Imagen 20: Modelo desarrollado en Simulink 32
Imagen 21: Bloque tanque de agua 32
Imagen 22: Parámetros del bloque de tanque de agua 33
Imagen 23: Bloque de cálculo de propiedades 33
Imagen 24: Subsistema dentro del bloque de cálculo de propiedades 34
Imagen 25: Bloque intercambiador de calor 34
Imagen 26: Subsistema dentro del bloque intercambiador de calor 35
Imagen 27: Parámetros del bloque de tanque en la simulación 1 36
Imagen 28: Parámetros del bloque intercambiador de calor para la simulación 1 36
Imagen 29: Resultados de la simulación 1 37
Imagen 30: Flujo de calor vs flujos másicos 37
Imagen 31: Planta de pruebas del intercambiador de calor 38
Imagen 32: Formato de orden de mantenimiento 73
Imagen 33: Formato de roles y responsabilidades de personal 75
Imagen 34:Planificacion anual de mantenimiento 76
Imagen 35: Flujograma del proceso de mantenimiento 76
Imagen 36: Organigrama centrado en el manejo de la planta 77

Lista de Tablas

Tabla 1: Propiedades termodinámicas 29
Tabla 2: Factores de corrección del coeficiente de transferencia de calor 31
Tabla 3: Condiciones de trabajo para simulación 1 35
Tabla 4: Listado de equipos de planta 39
Tabla 5: Codificación de los activos 40
Tabla 6: Inventario de activos en operación y de repuesto 41
Tabla 7: Plantilla registro de recursos humanos 74

Tabla de contenido

1. Introducción 3
2. Antecedentes y estado del arte 3
   2.1. Restricciones principales del proyecto 7
   2.2. Otras restricciones 8
3. Marco teórico 8
   3.1. Gemelo digital: 8
   3.2. Mantenimiento preventivo: 9
   3.3. Intercambiador de calor: 9
   3.4. Intercambiador de calor de tubo y coraza 9
   3.5. ANSYS: 10
   3.6. SolidWorks: 10
   3.7. MATLAB Simulink: 10
4. Problema y justificación 10
5. Pregunta de investigación 11
   5.1. Hipótesis: 11
   5.2. Preguntas adicionales: 12
6. Objetivos 12
   6.1. Objetivo Principal 12
   6.2. Objetivo específicos 12
7. Metodología 13
   7.1. Etapa de recopilado de información (Etapa 1) 13
   7.2. Etapa de simulación por Matlab - Simulink (Etapa 2) 14
   7.3. Etapa de modelado 3D en ANSYS (Etapa 3) 15
   7.4. Etapa de pruebas y comparaciones (Etapa 4) 17
   7.5. Elaboración del plan de mantenimiento preventivo (Etapa 5) 19
      Velocidad del fluido 19
      Temperatura del fluido 20
      Presión del fluido 20
8. Simulaciones, Modelo final y resultados 21
8.1. Simulación por SolidWorks 21
8.2. Modelo matemático por medio de MATLAB - Simulink 28
8.3. Plan de mantenimiento 38
9. Conclusiones 78
10. Cronograma 79
Bibliografía 80

1. Introducción

En la era actual de la industria, la optimización de los procesos de mantenimiento es fundamental para garantizar la eficiencia operativa y la prolongación de la vida útil de los equipos. En este contexto, el desarrollo y simulación de gemelos digitales se presentan como una solución innovadora y prometedora. Este trabajo se centra en el diseño y simulación de un gemelo digital de un intercambiador de calor, utilizando herramientas de modelado 3D como SolidWorks, junto con MATLAB y Ansys para análisis y simulación.

El objetivo principal de este proyecto es implementar un enfoque de mantenimiento preventivo, aprovechando las capacidades de los gemelos digitales. Más allá de la mera reproducción virtual del intercambiador de calor, nos proponemos integrar principios de uso universal y consideraciones de sostenibilidad en el diseño y la metodología de mantenimiento.

La implementación de un modelo virtual permite anticipar y prevenir fallos potenciales, minimizando tiempos de inactividad y costos asociados. Además, este enfoque nos brinda la oportunidad de explorar y relacionar las variables clave que impactan en el rendimiento del intercambiador de calor, contribuyendo así a la optimización de los procesos industriales.

En este contexto, también nos proponemos abordar y relacionar algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas, particularmente aquellos relacionados con la producción y el consumo responsables, así como la acción por el clima. Al integrar estos principios en nuestro trabajo, buscamos contribuir no solo a la eficiencia operativa, sino también a un futuro más sostenible y resiliente.

2. Antecedentes y estado del arte

En el estudio del estado del arte nos enfocamos en la obtención de trabajos que sumen información a nuestro proyecto dando importancia a los conocimientos y la experiencia entregada por varios autores e investigadores.

Primero comenzamos con *The Importance of Preventive and Corrective Maintenance in Works*

El artículo resalta la importancia del mantenimiento preventivo y correctivo en la conservación de obras de ingeniería, enfocándose en la seguridad y comodidad de los usuarios. Propone una metodología detallada para gestionar estas prácticas, destacando beneficios como la reducción de costos y la mejora del servicio. Además, proporciona un modelo de referencia para la preparación y aplicación del mantenimiento, que puede ser aprovechado como guía para el desarrollo del gemelo digital. Aspectos relevantes incluyen la monitorización del estado de los equipos, la utilización de datos para la toma de decisiones y la integración con sistemas de gestión de mantenimiento existentes. Este artículo constituye una sólida base para el diseño e implementación del gemelo digital del intercambiador de calor, ofreciendo directrices claras y prácticas para su desarrollo.

Con respecto a la aplicación del mantenimiento preventivo a máquinas de fluido, esta ha sido ya muy profundizada mediante estudios, como nos explican Hongsheng y Qian y su aplicación del mantenimiento preventivo basado en la condición para turbinas de viento, mediante el uso de ecuaciones diferenciales estocásticas.

Se han estudiado tres formas de mantenimiento preventivo principalmente: el basado en el tiempo (TBM por sus siglas en inglés), el basado en la condición (CBM por sus siglas en inglés) y el basado en la condición y la oportunidad (CBOM por sus siglas en inglés).

Después de la simulación y modelado de cada uno de los mantenimientos para la misma turbia, la principal conclusión que nos presenta este artículo fue el superior desempeño del CBOM, pudiendo retrasar el proceso de deterioro de la máquina e imponer condiciones más estables de funcionamiento, esta técnica no solo resultará beneficiosa en turbinas, sino también en otros campos de aplicación similares, mencionan en las conclusiones.

Todo esto nos hace pensar que el mantenimiento preventivo también será muy beneficioso en su aplicación para un intercambiador de calor.

Posteriormente en *Analysis of tubular heat exchangers for different flow patterns using finite element method* que fue un trabajo del año 2014 publicado por *M. Dev Anand; I. J. Rohit* en *IEEE*. Este trabajo representa una examinación de los intercambiadores de calor de tubos y carcaza utilizando el modo de elementos finitos para optimizar su diseño.

Se sabe que la principal característica del intercambiador de calor es encontrar el área mínima que se usa para lograr con éxito la transferencia de calor máxima. Como dicha área tiene una relación considerable en su costo de manufactura, lo que se busca es; mediante el uso de software de elementos finitos, prototipar distintos diseños 3D, a fin de determinar las medidas adecuadas para lograr el mejor rendimiento de la máquina, dichas medidas luego fueron construidas en una maquina real y ambas se sometieron a las condiciones operativas de funcionamiento, resultando en que ambos funcionaban de manera similar (gemelo digital y maquina real), esto sería la principal conclusión del artículo citado, es factible la implementación de un gemelo digital por simulación 3D en un software de elementos finitos para la supervisión del funcionamiento de una maquina real.

Posteriormente, en el año 2020 se publica *Digital Twin for Shell and Tube Heat Exchanger in Industry 4.0* por los autores *Himanshu Singh, Utkarsh Mishra, Prateek Saxena, Ganesh Shetiya y Y. M. Puri* en *SPRINGER.* Donde se destaca la importancia de la digitalización de máquinas y procesos en la industria 4.0, centrándose mayoritariamente en la industria térmica, llegando a la conclusión de que la implementación de esta herramienta es importantísima para monitorear y controlar los parámetros de funcionamiento, puesto y dado que los procesos comunes en la industria energética (objeto de estudio), son fenómenos dinámicos y están en constante cambio, por lo que un control cercano e inmediato es no solo una buena implementación sino también, una parte necesaria de la industria actual.

En el 2022 se publica *Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review* por los autores *Raymon van Dinter, Bedir Tekinerdogan, Cagatay Catal* en el *ELSEIVER.*

En este trabajo se realiza una revisión sistemática de la literatura, que es una herramienta de enseñanza activa sobre otros estudios expuestos sobre el mantenimiento predictivo.

Los resultados de dichos estudios son obtenidos a través de diversas formas del mantenimiento predictivo utilizando gemelos digitales incluyendo tipos de presentación, abstracción, diseño y enfoques, tipos de comunicación, característica de hermanamiento y retos a la solución dándole una fijación en la ingeniería de software.

La conclusión por llegar de esta SRL de mantenimiento predictivo por modelo digital. Se responde preguntas claves para el esquema del modelo de mantenimiento. Se descubrió que la capacidad computacional de los tipos de datos dificulta los modelos y equipos, así como sus piezas que son los retos del esquema.

En el 2023 se publica *Predictive Maintenance of Heat Exchangers Using Digital Twin Models Systematic Literature Review* por los autores *A J Huzaifa* en el *ADIPEC.*

Este trabajo analiza el uso de gemelos digitales para descubrir con antelación y bastante precisión los problemas como la contaminación, tiempo de falla, desgaste de las piezas , etc.

El trabajo menciona la eficiencia que se puede cumplir con la instalación del mantenimiento. El trabajo expone modelos de gemelos digitales que poseen una predicción de fallas de funcionamiento por incrustaciones, la vida útil y varios paramentos relacionados con el rendimiento, todo ello, con una precisión de hasta el 99%. Este artículo, asimismo, demuestra el reducimiento de costos y mayores índices de sostenibilidad. Se proporciona métodos y prácticas para dicho mantenimiento.

Dentro del mismo año se publica *Uso de dinámica de fluidos computacional para el estudio de un intercambiador de calor de tubo y coraza* por los autores *García Bustamante, Víctor Andreé* en *PIRHUA.*

El estudio expone un nuevo tipo de perspectiva a los intercambiadores de calor de tubo y coraza a través del uso de la CFD o dinámica de fluido computacional. El estudio realizado va a ser útil a futuro para los intercambiadores de calor con un número significativo de pasos y tubos. El programa de computación usado es el ANSYS FLUENT que su principal característica es la reproducción numérica. En este software se usó el método de temperatura logarítmica[1] para el desarrollo del modelo del intercambiador de calor. Finalmente, con los datos obtenidos de las dimensiones del intercambiador se pudo reproducir en el software ANSYS para verificar la similitud de funcionamiento entre el gemelo digital y la máquina real.

[1] Método estandarizado para el diseño de intercambiadores de calor (Cengel, 2011)

- ✓ **Restricciones principales del proyecto**

2..1. Alcance

El alcance de este trabajo estará fijado a un ámbito universitario y de simulación digital, esperando obtener simulaciones y resultados realistas, involucraría la identificación de las condiciones de funcionamiento óptimas y los umbrales de alarma para detectar posibles fallos o deterioros en el intercambiador de calor. Además, el alcance abarcaría la implementación de algoritmos de análisis de datos y modelos predictivos para predecir el desgaste y la vida útil de los componentes, así como la generación de informes detallados sobre el estado y la salud del intercambiador de calor. Se observa que el alcance se centra netamente en algo digital, esto a razón de las siguientes restricciones, detalladas a continuación.

2..2. Costo

Se prevé que el costo del trabajo sea el menor posible, pero es menester mencionar que como monto máximo se ha considerado un aproximado de S/.200 para gastos esporádicos o que se requieran según avance el proyecto, dichos gastos serán subsidiados por los miembros del grupo de desarrollo de proyecto, de igual forma sabiendo que se cuentan ya con licencias institucionales proporcionadas por UDEP de MATLAB y ANSYS, estos softwares previstos para la realización del proyecto no se contaran dentro de los gastos generales Por otro lado, respecto al intercambiador de calor que se encuentra en el laboratorio de electrotecnia en UDEP, se dispuso por parte de nuestro asesor que, de ser necesaria, la toma de datos no supondría mayor costo, pues el equipo se nos seria prestado sin costo alguno. Como fue mencionado, en el ámbito de costo, el proyecto no presenta una restricción significativa.

2..3. Tiempo

Se cuenta con un espacio de tiempo considerado de 11 semanas, este tal vez sea la restricción más fuerte de todas, ya que, considerando la carga académica de todos los miembros del equipo, va a ser necesaria una delicada gestión del tiempo, para poder desarrollar de la mejor manera este proyecto, para esto va a ser necesaria la realización de un cronograma, donde detallaremos cada tarea y el tiempo que se le ha destinado.

- ✓ **Otras restricciones**

2..1. Riesgos

La lista de posibles riesgos se presenta a continuación:

- Pérdida de información, datos o archivos de simulación guardados en dispositivos tales como computadoras, esto debido al posible robo, pérdida o avería del dispositivo.
- Pérdida temporal o definitiva de un miembro del equipo, por diversas razones, una de las más comunes es una enfermedad, viaje o retiro de asignatura.
- Dificultad en las simulaciones, resultados no esperados o muy alejados de la realidad, debido a falta de experiencia en el uso de los softwares, falta de potencia computacional, etc.

2..2. Recursos

Se cuenta con recursos humanos tales como los miembros del equipo (4 personas), el asesor del grupo (1 persona) y posibles ayudas externas al equipo oficial. Por la parte de equipamiento, contamos con el intercambiador de calor presente en el laboratorio de electrotecnia UDEP, además de las licencias institucionales de MATLAB y ANSYS.

Finalmente, contamos con las instalaciones de la UDEP para poder avanzar el proyecto, entre estas instalaciones encontramos aulas, laboratorios, salas de estudio, etc.

3. Marco teórico

Con el transcurrir de los años, la necesidad de monitoreo en sistemas, equipos y dispositivos ha obligado a las personas a idear técnicas cada vez más avanzadas para simular y predecir el comportamiento de estos. Una de las técnicas más recientes y usadas, es el uso de gemelos digitales.

Para el mejor entendimiento de este proyecto, es necesario el conocimiento previo de ciertos conceptos que serán usados a lo largo de toda la investigación:

- ✓ **Gemelo digital:**

Es un modelo virtual de un objeto real, pueden ser desde piezas individuales hasta todo un sistema que funciona conjuntamente, generalmente utiliza sensores

conectados desde el objeto físico para simular y monitorear los procesos, permite el acceso de forma remota y facilita las acciones de mantenimiento, ya que es capaz de indicarnos síntomas y las posibles fallas que estos podrían acarrear (AWS Amazon).

- ✓ **Mantenimiento preventivo:**

Es un tipo de mantenimiento que consiste en realizar las labores de mantenimiento al activo con cierta frecuencia, con el fin de evitar futuras fallas, no importa la condición del activo al momento de la intervención, ya que se supone que el comportamiento del activo durante su vida útil es conocido. Se clasifica en: mantenimiento basado en el uso y mantenimiento basado en la condición (Yaksetig Castillo, 2015).

- ✓ **Intercambiador de calor:**

Es un equipo diseñado para transferir calor entre dos fluidos, existen diferentes tipos de arquitecturas y por ende tipos de funcionamiento, en nuestro caso nos enfocaremos en un Intercambiador de tubo y coraza.

- ✓ **Intercambiador de calor de tubo y coraza**

Es un tipo de intercambiador de calor en el cual uno de los fluidos circula a través de tubos delgados, y el otro lo rodea dentro de una coraza que envuelve todos los tubos, permite una gran relación de contacto entre el área de los tubos y el fluidos circundante, lo cual lo hace ideal para trabajar es espacios reducidos, es el tipo de intercambiador a simular en este proyecto, por la existencia de un modelo en el laboratorio de electrotecnia del edificio IME en la Universidad de Piura (UDEP).

Imagen 1: Intercambiador de tubo y coraza (DirectIndustry)

- ✓ **ANSYS:**

Ansys es un software de simulación para ingeniería ampliamente utilizado en los ámbitos de dinámica estructural, dinámica de fluidos, acústica, etc. Es muy utilizado en la industria, para este trabajo, nos será útil para la simulación del modelo 3D del intercambiador de calor elegido, y la transferencia de calor que se efectúa al momento de su funcionamiento, nos permite manipular variables externas e internas al sistema, tales como temperatura de los fluidos, el caudal, velocidad del fluido, la temperatura ambiente, etc.; además de permitirnos obtener gran variedad de resultados, a través de gráficas, diagramas, valores, etc. Además, es fácilmente integrable con otras herramientas y softwares existentes.

- ✓ **SolidWorks:**

SolidWorks es un software CAD 3D, para el modelaje de piezas y ensamblajes 3D, además de planos 2D, nos ofrece gran variedad de productos dentro de la licencia, el principal objetivo de SolidWorks en este proyecto será el de diseño y modelado 3D del intercambiador de calor, para su posterior exportación a Ansys, donde se realizará el estudio de fluido correspondiente.

- ✓ **MATLAB Simulink:**

Simulink es una herramienta incluida en el paquete de Matlab, que usa un entorno de diagramas de bloque para diseñar sistemas con modelos multidominio, sin necesidad de escribir código, entre los sistemas que se pueden simular en Simulink tenemos sistemas de control, sistemas de robótica, sistemas de procesamiento de señales, y el objetivo de este proyecto, gemelos digitales.

4. Problema y justificación

La falta de optimización del desempeño de un intercambiador de calor genera ineficiencia energética, exacerbando el desgaste y las fallas prematuras, agravando así la incapacidad para realizar un mantenimiento predictivo efectivo.

La implementación de un mantenimiento preventivo en lugar del actual mantenimiento correctivo puede conducir a un ahorro significativo de costos y evitar tiempos de inactividad costosos. Esto se lograría al abordar proactivamente los problemas potenciales antes de que se conviertan en fallas graves, mitigando así el desgaste y las fallas prematuras del intercambiador de calor. Además, al mejorar la capacidad predictiva para el mantenimiento, se podría optimizar el regimen de funcionamiento del

intercambiador de calor para reducir la ineficiencia energética, lo que tendría un impacto directo en la eficiencia operativa y en la reducción de costos asociados con el consumo de energía.

Asimismo, la introducción de un gemelo digital permitiría tener una mayor flexibilidad en el estudio de variables clave en el proceso de intercambio de calor y su impacto en el rendimiento del sistema. Esto permitiría una mejor comprensión de las interacciones complejas entre los factores operativos y el rendimiento del intercambiador de calor, lo que a su vez facilitaría la toma de decisiones informadas para optimizar la operación del sistema y maximizar la eficiencia energética. En última instancia, esta combinación de enfoques proactivos y una comprensión más profunda del proceso de intercambio de calor conduciría a una mejora general en la confiabilidad y el rendimiento del sistema, con beneficios significativos en términos de costos y eficiencia operativa.

Con respecto a los ODS, podemos relacionar nuestro proyecto con:

Industria, Innovacion e infraestructura: La implementacion de un gemelo digital representa un novedoso uso aplicativo de modelos matematicos para maquinas industriales por medio de recursos computacionales, aparte esto nos ayuda a brindarle de una mayor flexibilidad al uso de la maquina, y por ende su impacto en la industria en la que se envuelve.

Produccion y consumo responsable: La implementacion de un mantenimiento preventivo, aparte de reducir costos en comparativa con los mantenimientos correctivos, tambien reducira la cantidad de desechos industriales y de las piezas manufacturadas en un gran lapso de tiempo.

5. Pregunta de investigación

<u>¿Cómo puede el uso de un gemelo digital mejorar el mantenimiento preventivo de los intercambiadores de calor?</u>

- ✓ **Hipótesis:**
- Hipótesis nula (H0): No hay diferencia significativa en la eficacia del mantenimiento preventivo entre el uso de un gemelo digital y los métodos tradicionales.
- Hipótesis alternativa (H1): El uso de un gemelo digital aumentará la eficiencia del mantenimiento preventivo de los intercambiadores de calor al proporcionar una mejor comprensión de su estado operativo y pronosticar fallas potenciales.

✓ **Preguntas adicionales:**

- ¿Cómo afecta la implementación de un gemelo digital en la planificación del mantenimiento preventivo?
- ¿Cuál es el impacto del gemelo digital en la detección temprana de problemas o fallas en los intercambiadores de calor?
- ¿Qué tipo de datos y sensores son necesarios para alimentar de manera efectiva el gemelo digital y garantizar resultados precisos en el mantenimiento preventivo?
- ¿Cuál es el costo asociado con la implementación y operación de un gemelo digital en comparación con los métodos de mantenimiento preventivo convencionales?
- ¿Qué desafíos técnicos y logísticos podrían surgir durante la integración y utilización del gemelo digital en el contexto específico de los intercambiadores de calor?

6. Objetivos

✓ **Objetivo Principal**

El objetivo principal de este proyecto es reunir una considerable cantidad de datos para crear un modelo de gemelo digital del intercambiador de calor y elaborar su plan de mantenimiento preventico.

✓ **Objetivo específicos**

- Disminuir costos diagnosticando de forma temprana por medio de los gemelos digitales las posibles fallas del equipo.
- Mejorar el tiempo de funcionamiento y minimizar el tiempo de acarreo del equipo a través de las simulaciones.
- Incrementar los factores de seguridad haciendo evaluciones del gemelo para localizar los desgastes del equipo y optimizar su funcionamiento asegurando la protección de los operarios.
- Incrementar la vida útil a través del mantenimiento preventivo de manera que se pueda evitar las fallas graves que pueden ocurrir en el intercambiador de calor.

7. Metodología

A continuación, se detalla la metodología a seguir para el cumplimiento de objetivos antes detallados, es importante primero, establecer la división del proyecto en las siguientes etapas:

- ✓ **Etapa de recopilado de información (Etapa 1)**

En esta etapa se realizará toda la búsqueda necesaria respecto al estado del arte y el marco teórico establecido, se recopilarán, consultarán y leerán artículos y autores relacionados con las disciplinas involucradas.

Sera importante de igual forma, y dado el enfoque planteado en el presente trabajo caracterizar el uso, medio y parámetros operacionales estándar en los que se desempeñara el intercambiador de calor.

Es por ello que se realizó una visita al laboratorio de electrotecnia para observar y caracterizar la máquina de estudio.

Imagen 2: Tapa de la coraza

Imagen 3: Coraza del intercambiador

Imagen 4: Tubos del intercambiador con sus separaciones

Imagen 5: Sistema de bombeo y prueba del intercambiador de calor

Habiendo culminado con la recopilación de información necesaria, se procederá a realizar la configuración de los requerimientos para la construcción del gemelo digital; cuáles serán sus rangos operativos, dimensiones de la pieza real, geometría del intercambiador, fluidos de trabajo, variables relevantes y parámetros a monitorizar y variar, etc.

- ✓ **Etapa de simulación por Matlab - Simulink (Etapa 2)**

  En esta etapa se hará uso de Matlab y Simulink para desarrollar la simulación del intercambiador a través del desarrollo de un modelo matemático gobernado por las ecuaciones características que definen el comportamiento de un intercambiador de calor del tipo tubo coraza.

El primer paso para llevar a cabo esta etapa será la definición de las ecuaciones, usando la bibliografía disponible acerca del tema de interés, una vez definidas estas, se desarrollará un programa en Matlab y Simulink donde se ingresarán estas ecuaciones y se obtendrán las variables de interés.

Toda esta etapa es consecuente de la etapa 1, sin embargo, se desarrollará de forma paralela con la etapa 3 y 4, que se definirán más adelante.

✓ **Etapa de modelado 3D en ANSYS (Etapa 3)**

Para la elaboración del modelado 3D se hará uso de la herramienta WorkBench de Ansys, donde con las herramientas Fluid Flow, Geometry, Results y Solution, nos permite realizar un diagrama esquemático de las pruebas y resultados de nuestro modelo, lo que, a su vez, nos facilita las pruebas con diferentes parámetros de funcionamiento en un solo archivo.

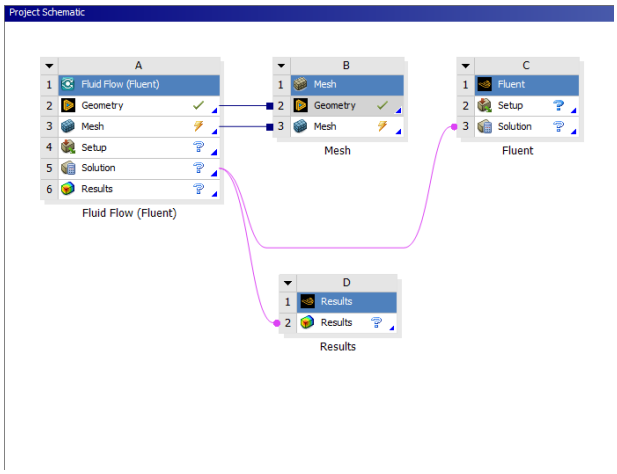


Imagen 6: Distribución de trabajo en Ansys Workbench

Centrándonos en el modelado en sí, en esta etapa se comenzara a plasmar mediante un software CAD (NewSpaceClaim-Ansys Fluent) la geometría 3D de la máquina, estableciendo los sólidos y áreas de interés para el consecuente análisis, se opta por este software en vez del uso de SolidWorks debido a la falta de control respecto a este último punto, pues al momento de importar el archivo a este programa, el modelo 3D no identificaba correctamente la separación deseada de sólidos, es por todo ello, que se optó por el uso del software propio de Ansys para la elaboración desde 0 del modelo 3D del intercambiador de calor.

7..1. <u>Geometría del modelo</u>

Para definir la geometría del modelo en ANSYS, se seguirán las medidas específicas del intercambiador de calor bajo estudio. Esto implica la precisa reproducción de las dimensiones y configuraciones geométricas del intercambiador, asegurando así una representación fiel de su estructura física en el entorno virtual. Además, se prestará especial atención a la creación de interfaces y conexiones entre los diferentes componentes para garantizar un modelado preciso del flujo de calor a través del sistema. Estas interfaces serán diseñadas cuidadosamente para asegurar una transición suave del flujo entre las diversas regiones del intercambiador, minimizando así posibles discontinuidades que puedan afectar la precisión de los resultados. La geometría resultante servirá como base fundamental para la generación de la malla y la posterior simulación numérica, asegurando una representación precisa del comportamiento térmico y fluidodinámico del intercambiador en estudio.

Con respecto a la geometría del modelado 3D, como se mencionó antes, habrá la siguiente distribución de sólidos y áreas para su análisis:

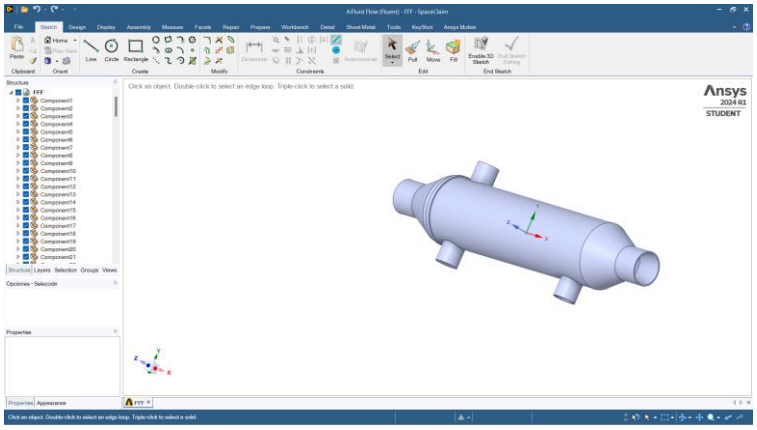


Imagen 7: Distribución de sólidos y componentes del modelo CAD del intercambiador de calor

7..2. Propiedades de malla del modelo

Una vez completada la definición de la geometría, se procederá a generar una malla de elementos finitos que capture adecuadamente la complejidad de la geometría y las características del flujo. Esta malla se construirá cuidadosamente, considerando aspectos como la densidad de elementos en áreas críticas, la distribución adecuada de los nodos y la calidad de los elementos. Se asignarán propiedades específicas a los elementos de la malla, como tamaño, forma y tipo, con el objetivo de garantizar una representación precisa del comportamiento del

flujo y del intercambio de calor en todo el dominio del intercambiador. La calidad de la malla es importante para la precisión y la convergencia de la simulación numérica, permitiendo una evaluación confiable del rendimiento térmico y fluidodinámico del intercambiador de calor.

7..3. Parámetros de solución del modelo

En esta etapa, se definirán los parámetros de solución necesarios para llevar a cabo la simulación numérica. Esto incluirá la selección del modelo de flujo y de transferencia de calor más apropiado, así como la especificación de las condiciones de contorno y los materiales involucrados en el proceso de intercambio de calor. Además, se establecerán los criterios de convergencia y los métodos numéricos a utilizar durante la simulación. Estos parámetros influirán en la precisión y la eficiencia del análisis numérico.

7..4. Solución del modelo

Una vez configurado el modelo y definidos los parámetros de solución, se procederá a resolver las ecuaciones fundamentales que describen el comportamiento del flujo y del intercambio de calor en el intercambiador. Utilizando las capacidades de ANSYS, se calcularán de manera eficiente y precisa las distribuciones de temperatura, velocidad y otras variables de interés en todo el dominio del intercambiador. Estos resultados proporcionarán una visión detallada del comportamiento térmico y fluidodinámico del sistema, permitiendo evaluar su rendimiento de manera exhaustiva. Además, se analizarán aspectos relacionados con la eficiencia térmica, la pérdida de carga y otros parámetros relevantes.

- ✓ **Etapa de pruebas y comparaciones (Etapa 4)**

El gemelo digital se basa en el modelo real expuesto anteriormente. El gemelo digital se va a enfocar en la contaminación del equipo. Se busca medir el grado de degradación en la eficiencia general y el aumento de los tiempos de inactividad. Se va a diseñar con las ecuaciones que caracterizan su funcionamiento.

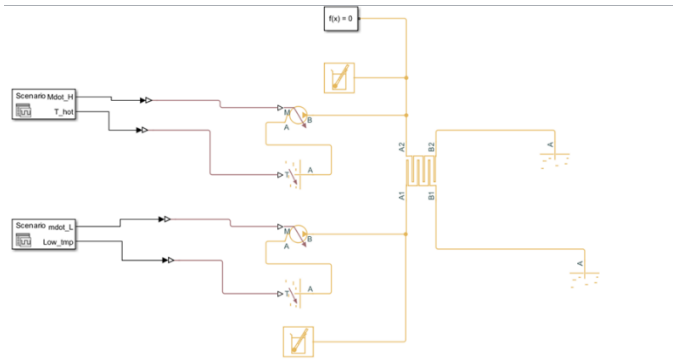


Imagen 8: Esquema de intercambiador de calor en Simulink

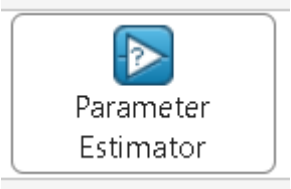
Cada lado del fluido que fluye hacia el intercambiador de calor está determinado por los bloques de características térmicas del fluido, el caudal másico y la temperatura del fluido están determinados por la fuente de control del flujo másico y los bloques de unidad de control, respectivamente.

El bloque intercambiador de calor NTU incluye todas las ecuaciones y parámetros necesarios, por lo que los usuarios no tienen que crear ecuaciones para construir bucles algebraicos para las ecuaciones del sistema.

Las variables relacionadas con las condiciones operativas se seleccionan a partir de datos de campo y se ingresan en el modelo como entradas utilizando un editor de señales.

El factor de degradación (FF) es uno de los parámetros del conjunto del intercambiador de calor y se puede configurar como parámetro para evaluar los otros parámetros.

La estimación de parámetros es una parte funcional en el diseño de Simulink.



La estimación de parámetros utiliza datos experimentales, a menudo derivados de datos de campo, para realizar cálculos retroactivos utilizando técnicas de optimización, este paso a menudo se denomina elaboración del gemelo digital porque los parámetros del modelo se reestructuran en función de los datos de campo.

Los datos experimentales se obtuvieron a partir de un conjunto de datos de campo en condiciones operativas controladas: Temperatura y masa del fluido 1 y del fluido 2 en

la entrada del intercambiador de calor. Este paso se repite para varios subconjuntos de datos completos con condiciones operativas controladas similares para encontrar una correlación entre el factor de incrustación y la eficiencia de transferencia de calor.

Los datos de tendencia históricos siempre han revelado una disminución de las tasas de intercambio de calor durante mucho tiempo, esto refleja el fenómeno de degradación o contaminación, por ello, se seleccionaron diferentes grupos de condiciones para calibrar las estimaciones del coeficiente de contaminación.

Habiendo evaluado hasta qué punto los siguientes factores están correlacionados con el rendimiento de la transferencia de calor, podemos ejecutar algunas simulaciones para crear un mapa de degradación y construir un modelo de resistencia residual basado en la similitud. Al correlacionar los siguientes factores con diferentes períodos de tiempo para variar la tasa de degradación en el escenario de degradación lineal, se pueden generar los escenarios de degradación de referencia restantes. Por ejemplo:

– Modelo de vida útil restante basado en similitud
– Simulación de modelo con tiempo de degradación.
– Simulación del modelo con condiciones de operación.

Finalmente, como prueba determinante de esta etapa se hará un conjunto de revisiones y comparativas entre los resultados de ambos tipos de modelo, tanto del intercambiador modelado por Ansys como del modelo de gemelo digital creado en Matlab.

El porcentaje de error admisible entre varianza de resultados no deberá exceder el 10%, en caso no lo supere, se deberá realizar una revisión sistemática de todos los parámetros de construcción de ambos modelos, a fin de poder determinar la causa del error.

- ✓ **Elaboración del plan de mantenimiento preventivo (Etapa 5)**

Habiendo superado el requisito mínimo de la etapa previa, se puede aseverar con cierta exactitud, que se posee un modelo matemático que refleja el comportamiento de la maquina real, bajo esta premisa realizaremos pruebas de:

Velocidad del fluido

Esto es importante, pues una mayor velocidad del fluido genera un tipo de desgaste sobre las aletas de intercambio, si bien una mayor velocidad puede aumentar la tasa de intercambio de calor, también reduce el tiempo de vida útil de

la paleta, pues reduce mucho más rápido el espesor de la placa, que además en conjunto con el esfuerzo variable por la variación de temperatura que sufre, la vuelve inutilizable en poco tiempo.

Temperatura del fluido

La temperatura del fluido es sin duda, el factor de mayor importancia, pues es el parámetro que no es controlable, ya que depende de las condiciones previas de trabajo del fluido, si por ejemplo en una instalación minera, si se quiere aumentar la tasa de refinado de materiales como zinc y níquel, se registrara un aumento de la temperatura del fluido que ingresa caliente al intercambiador.

Es por ello que el presente mantenimiento preventivo se centrara en analizar factores de seguridad y tiempos de falla para diferentes temperaturas de funcionamiento.

Presión del fluido

La presión de entrada tanto del fluido frio como el caliente, influyen principalmente en los esfuerzos de las tuberías y de los compartimentos del intercambiador de calor, es por ello que se establecerán límites claros para el funcionamiento de esta variable por medio del análisis experimental.

Por otro lado, tenemos diversos riesgos de falla en un intercambiador, los cuales a pesar de no depender de los parámetros de funcionamiento son necesarios implementar o al menos tomar en cuenta:

Incrustaciones: es probable que se cuelen algunos sedimentos o partículas suspendidas dentro del fluido, que tras darse el intercambio o en zonas donde disminuye la velocidad de flujo, se decanten por gravedad y terminen formando tapones que obstruyan el flujo dentro del intercambiador, es por ello que dentro del mantenimiento preventivo se darán sugerencia de cómo lidiar con ello.

Ambientes altamente corrosivos: Al ser la máquina de estudio, una herramienta usada en diversos ambientes de la industria, uno de los más peligrosos vendría a ser la industria química, donde algunos gases altamente corrosivos se encuentran suspendidos en el aire, es por ello que se deberá tomar en cuenta el ambiente de trabajo al momento de hacer el plan de mantenimiento preventivo.

Con toda la información antes recopilada, ya sea por medio de pruebas de funcionamiento como por conocimiento de la industria.

8. Simulaciones, Modelo final y resultados

✓ **Simulación por SolidWorks**

8..1. Metodología para el modelo de simulación

El intercambiador de calor diseñado es de tipo flujo paralelo y se encuentra instalado en el laboratorio de electrotecnia. La carcasa, incluyendo los deflectores, está fabricada en acero inoxidable AISI 304, mientras que los tubos del intercambiador están hechos de latón 70/30.

❖ Materiales utilizados:

Para el diseño del intercambiador de calor, se utilizaron los siguientes materiales:

- Acero inoxidable AISI 304:
  - Densidad: 8.53 kg/m³
  - Calor específico: 376.81 J/kg*K
  - Conductividad térmica: 121.42 W/m*K (isotrópico)
- Latón 70/30:
  - Densidad: 7930 kg/m³
  - Calor específico: 500 J/kg*K
  - Conductividad térmica: 16.2 W/m*K (isotrópico)

❖ Geometría y dimensiones del intercambiador:

Las dimensiones del intercambiador de calor se tomaron directamente del dispositivo físico presente en el laboratorio. Estas medidas detalladas se especifican en los Anexos 1, 2 y 3, donde se proporcionan los planos y diagramas correspondientes, también se pueden observar en las imagen 9,10 y 11.

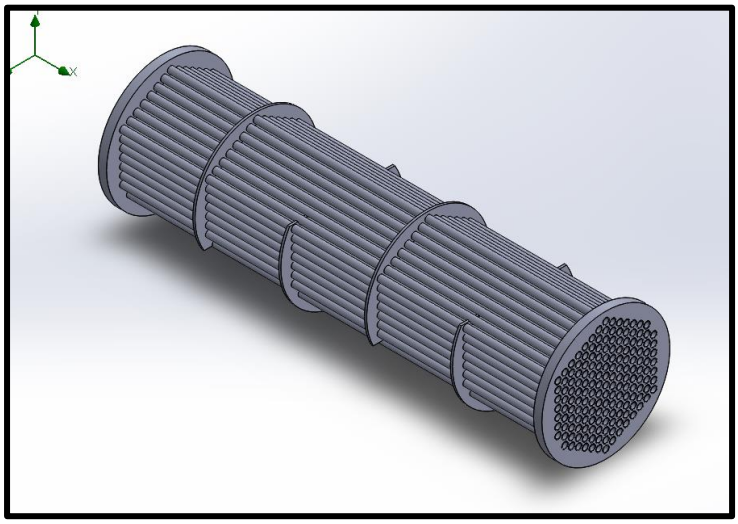


Imagen 9: Núcleo del intercambiador de calor (Fuente: Autoría propia)

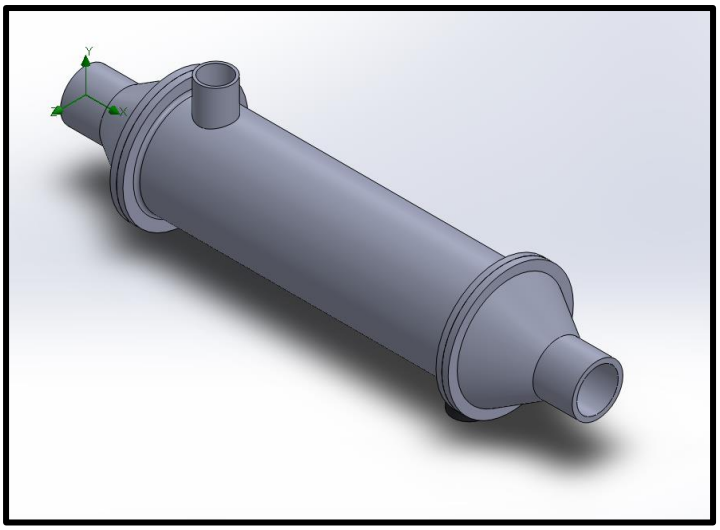


Imagen 10: Carcasa del intercambiador de calor (Fuente: Autoría propia)

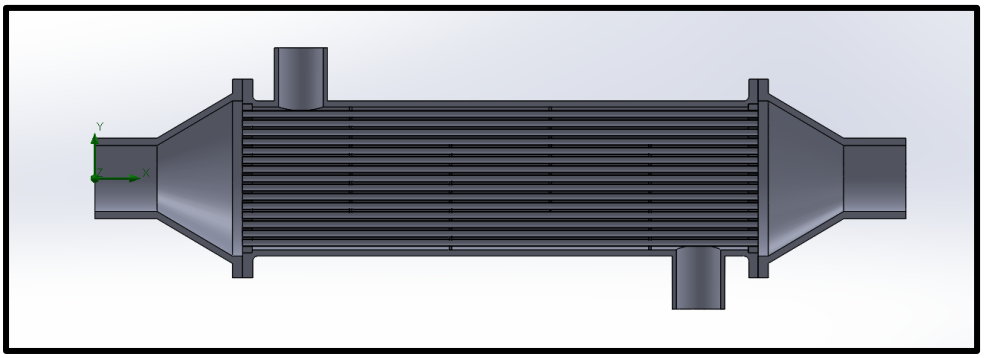


Imagen 11: Vista longitudinal del intercambiador de calor (Fuente: Autoría propia)

8..2. Configuración del análisis en SolidWorks Flow Simulation

Para este apartado se realizará la configuración para inicializar la simulación en el solver del programa SolidWorks.

- Parámetros de simulación:

Para esta simulación, se utilizaron las siguientes condiciones de entrada para explicar el procedimiento:

- Entrada del flujo caliente: 10 kg/s de agua caliente a 80 °C.
- Entrada del flujo frío: 3 kg/s de agua fría a 30 °C.
- Salida del flujo caliente: Se asume que la salida está a condiciones ambientales de presión (1 atm y 20.05 °C).
- Salida del flujo frío: Se asume que la salida está a condiciones ambientales de presión (1 atm y 20.05 °C).

Cabe destacar que estos parámetros pueden variarse según las necesidades del análisis. La flexibilidad en los parámetros de entrada

permite explorar diferentes escenarios operativos y evaluar el desempeño del intercambiador de calor bajo diversas condiciones de flujo másico y temperatura.

- Condiciones de contorno y suposiciones:
  - Se supone que no hay pérdida de calor desde la superficie de la carcasa hacia el exterior, es decir, se considera adiabático.
  - La entrada del flujo másico en ambos fluidos es perpendicular al plano correspondiente de cada uno.
  - El fluido tendrá comportamiento tanto laminar como turbulento, dependiendo de las condiciones locales de flujo y Reynolds.
- Malla utilizada en la simulación:
  - Para asegurar una simulación precisa, se utilizó el nivel 4 de mallado en SolidWorks. Este nivel proporciona un balance adecuado entre la precisión de los resultados y el tiempo de computación requerido.
- Criterios de convergencia:
  - Se utilizaron los criterios de convergencia predefinidos por SolidWorks Flow Simulation para asegurar que los resultados sean confiables y precisos. Estos criterios incluyen la estabilización de las variables de interés, como temperatura y presión, a lo largo del proceso de iteración.

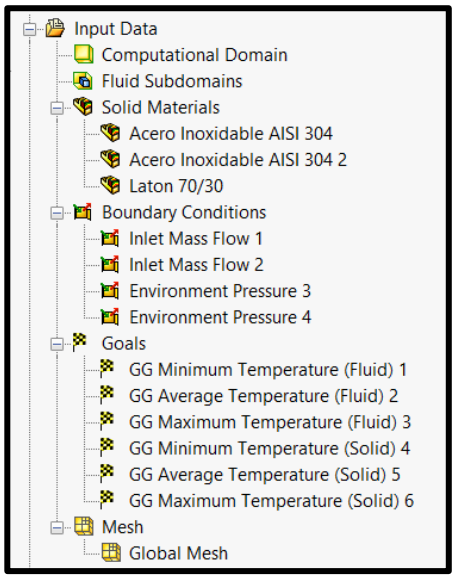


Imagen 12: Parámetros antes mencionados ingresados para la simulación (Fuente: Autoría propia)

8..3. Resultados de la simulación por SolidWorks

8..3.1. Entrada del fluido caliente

Como se observa en la imagen 13, la entrada del fluido caliente se encuentra a 80°C, lo cual es consistente con la condición inicial del problema. Esta temperatura de entrada es la esperada y no presenta anomalías, confirmando que las condiciones iniciales han sido correctamente configuradas.

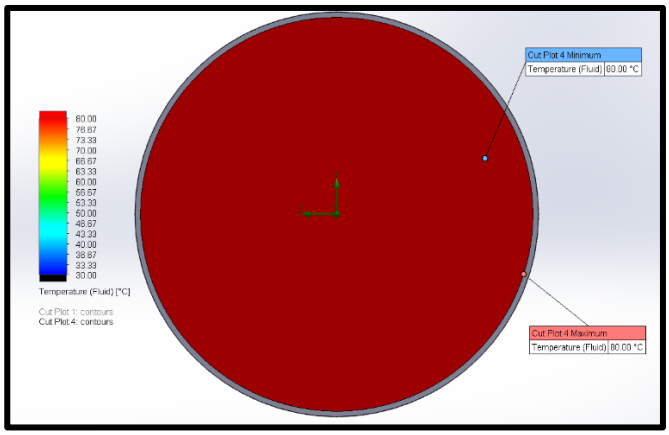


Imagen 13: Contorno de color de temperatura de la entrada de agua caliente (Fuente: Autoría propia)

8..3.2. Entrada del fluido frío

De manera similar, la imagen 14 muestra que la entrada del fluido frío está a 30°C, en concordancia con las condiciones iniciales del problema. Al igual que con el fluido caliente, no se observan desviaciones de la temperatura esperada en este punto.

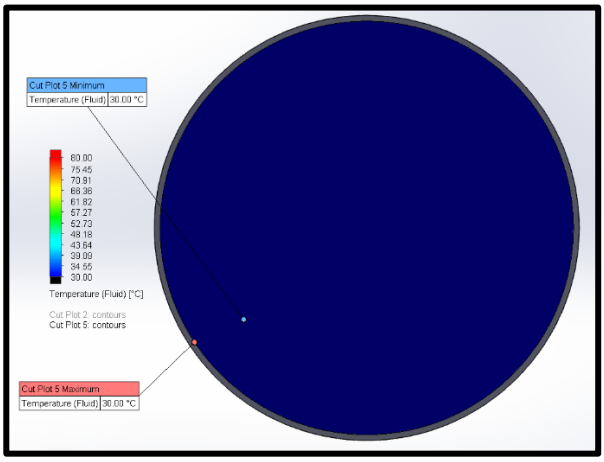


Imagen 14: Contorno de color de temperatura de la entrada de agua fría (Fuente: Autoría propia)

8..3.3. Salida del fluido caliente

La Imagen 15 ilustra la distribución de temperatura en la salida del fluido caliente, que varía desde los 63.93°C hasta los 91.93°C, con una temperatura media a lo largo del contorno de 77.55°C. Esta variación es indicativa de un intercambio de calor efectivo a lo largo del intercambiador.

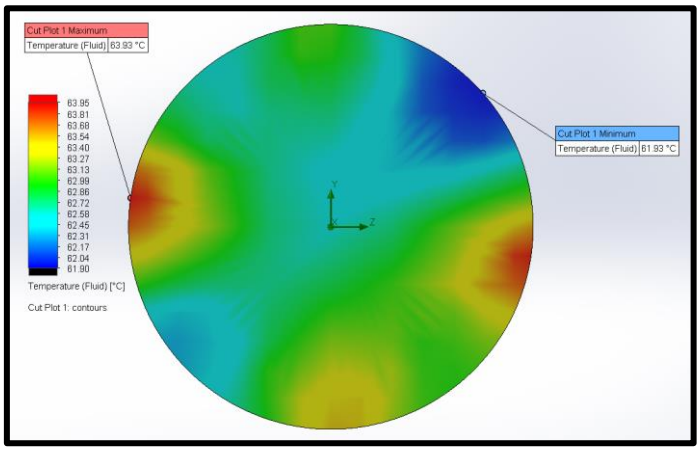


Imagen 15: Contorno de color de temperatura de la salida de agua caliente (Fuente: Autoría propia)

8..3.4. Salida del fluido frío

En la Imagen 16, se observa que la temperatura del fluido frío a la salida varía entre 34.10°C y 35.99°C, con una media de 34.50°C. Esta ganancia de temperatura demuestra que el fluido frío ha absorbido calor del fluido caliente de manera efectiva.

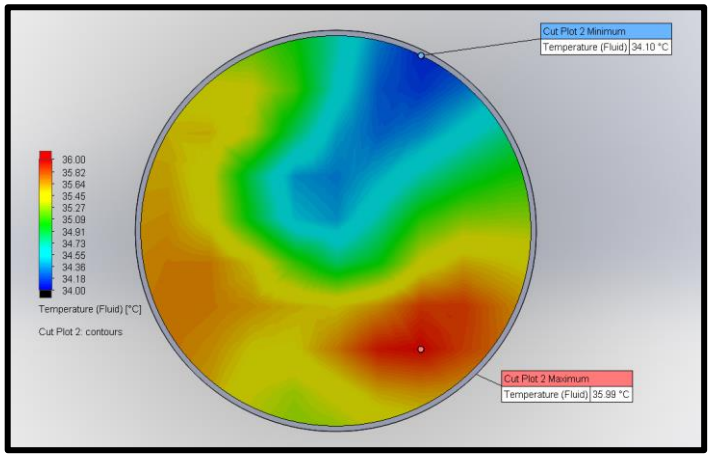


Imagen 16: Contorno de color de temperatura de la salida de agua fría (Fuente: Autoría propia)

8..3.5. Vista longitudinal del contorno de calor del intercambiador de calor

La Imagen 17 proporciona una vista longitudinal del intercambiador, mostrando cómo la temperatura del fluido caliente disminuye desde 80°C a 62.55°C a medida que fluye a través de los tubos. Simultáneamente, se observa un aumento de la temperatura del fluido frío en la parte exterior de los tubos, desde 30°C hasta 34.50°C, indicando un buen intercambio térmico.

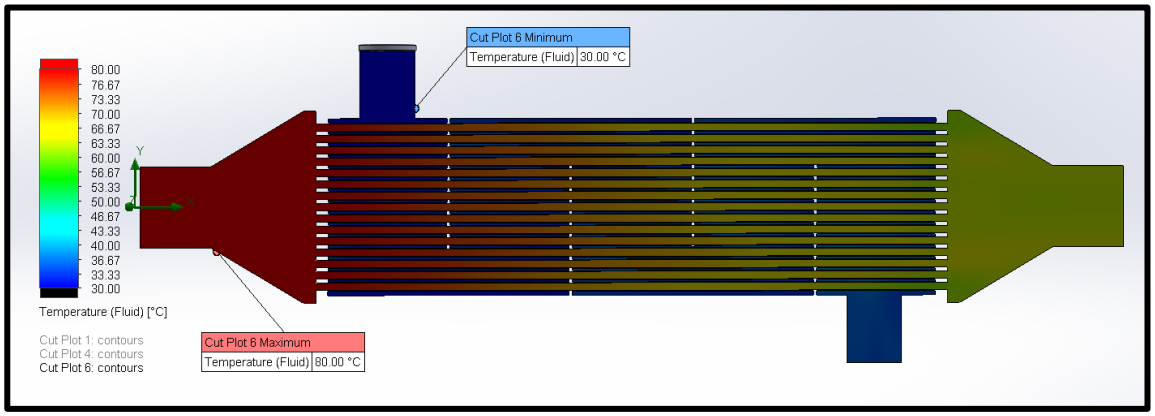


Imagen 17: Contorno de color de temperatura de la vista longitudinal del intercambiador de calor (Fuente: Autoría propia)

8..3.6. Trayectoria del fluido caliente

En la Imagen 18, se puede ver la trayectoria del fluido caliente. Se observa que el flujo es turbulento antes de entrar en los tubos pequeños, pero una vez dentro de estos, el comportamiento del flujo se vuelve laminar.

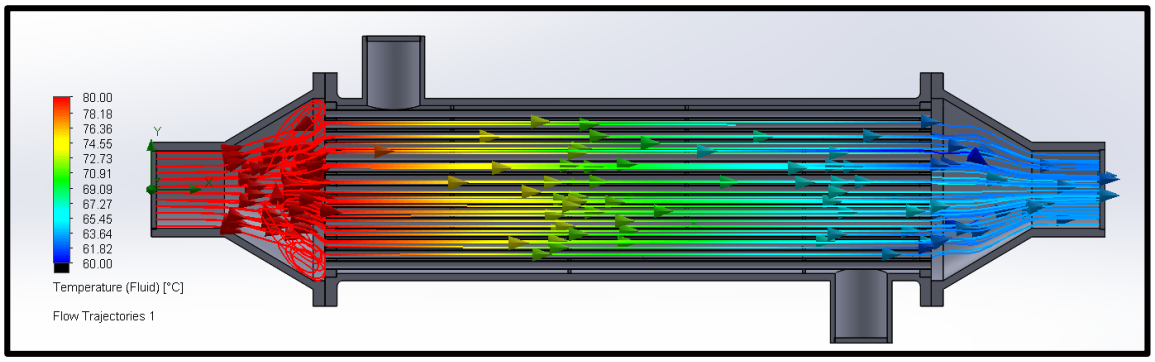


Imagen 18: Trayectoria del fluido caliente (Fuente: Autoría propia)

8..3.7. Trayectoria del fluido frio.

La Imagen 19 muestra la trayectoria del flujo frío, que se mantiene turbulento a lo largo de toda su trayectoria. Este comportamiento turbulento es deseable para maximizar el intercambio de calor con las paredes de los tubos por donde circula el fluido caliente, mejorando así la eficiencia del intercambiador.

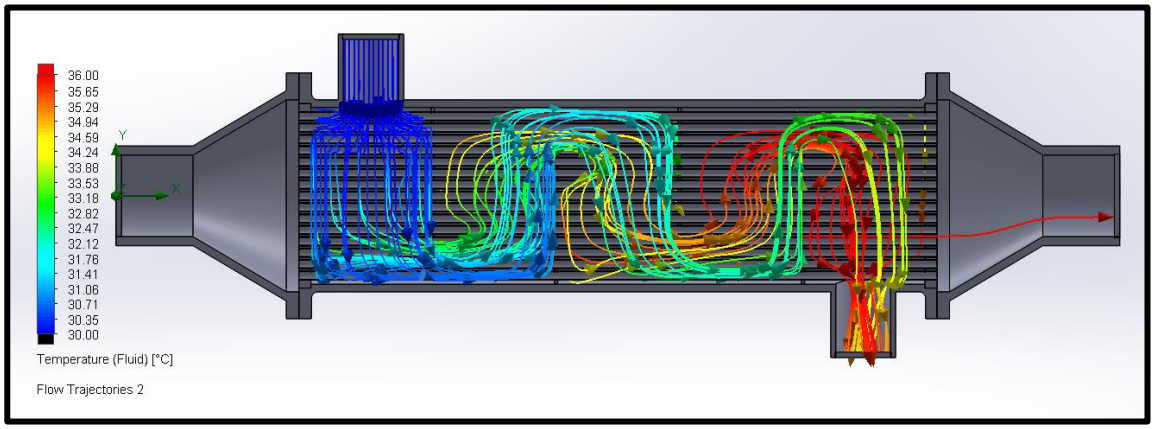


Imagen 19: Trayectoria del fluido frío (Fuente: Autoría propia)

- ✓ **Modelo matemático por medio de MATLAB - Simulink**

Como se definió en la metodología inicial, el modelo matemático ha sido desarrollado con ayuda de los softwares Matlab y Simulink, el primer paso fue definir las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de un intercambiador de tubo coraza, haciendo uso de la bibliografía disponible, el comportamiento del intercambiador se definió de la siguiente manera:

8..1. Método de estudio por formulación matemática

El método de estudio aplicado al intercambiador ha sido el de efectividad-NTU (number of transfer units), se ha elegido este método ya que permite estimar las temperaturas de salida de ambos fluidos a través de un balance de energía, este método se basa en un parámetro adimensional llamado efectividad de la transferencia de calor ε definido como:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{Razón\ de\ la\ transferencia\ de\ calor\ real}{Razón\ máxima\ posible\ de\ la\ transferencia\ de\ calor}$$

Donde la razón real de transferencia de calor está definida por la siguiente fórmula:

$$\dot{Q} = C_{cold} \cdot \left(T_{cold,out} - T_{cold,in}\right) = C_{hot} \cdot \left(T_{hot,in} - T_{hot,out}\right)$$

Donde:

$$C_{hot} = c_{p,hot} \times \dot{m}_{hot}$$

$$C_{cold} = c_{p,cold} \times \dot{m}_{cold}$$

Donde los subíndices hot y cold hacen referencia a que la presente propiedad/variable es medida en los fluidos caliente y frío respectivamente, este sistema de referencia se mantendrá durante todo el documento.

Para poder determinar la razón máxima de transferencia de calor, es necesario conocer la diferencia de temperatura máxima que se produce en el intercambiador, siendo esta la siguiente:

$$\Delta T_{max} = T_{hot,in} - T_{cold,in}$$

Entonces, la razón máxima de transferencia de calor será dada por la siguiente formula:

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} \cdot \Delta T_{max}$$

Donde C_{min} es el valor menor entre C_{cold} y C_{hot}.

Cabe mencionar que, gracias a que se conoce la temperatura de entrada de ambos fluidos, es posible determinar de manera sencilla las siguientes propiedades de fluido:

Densidad (ρ)	kg/m^3
Calor específico (c_p)	$J/kg - K$
Conductividad térmica (k)	$W/m - K$
Viscosidad cinemática (ν)	m^2/s
Número de Prandtl (Pr)	$-$

Tabla 1: Propiedades termodinámicas (Fuente: Autoría propia)

Considerando que se conocen las temperaturas de entrada de ambos fluidos, sus propiedades y sus flujos másicos, observamos que no hay suficiente información para determinar las temperaturas de salida, es por eso que debemos calcular la efectividad del intercambiador, la cual está dada por la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = 2\left[1 + c + \sqrt{1 + c^2} * \frac{1 + \exp\left[-NTU\sqrt{1 + c^2}\right]}{1 - \exp\left[-NTU\sqrt{1 + c^2}\right]}\right]^{-1}$$

Donde:

$$c = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad y \quad NTU = \frac{U * A_s}{C_{min}}$$

Donde:

$$U: coeficiente\ total\ de\ transferencia\ de\ calor\ \left[\frac{W}{m^2 - K}\right]$$
$$A_s: Area\ de\ la\ transferencia\ de\ calor\ [m^2]$$

Estos parámetros se pueden conocer y vienen dados de la siguiente manera:

$$\frac{1}{U * A_s} = R_{total}$$

$$R_{total}: Resistencia\ termica\ total\ del\ intercambiador$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o A_o} + R_{tubo} + \frac{R_{fi}}{A_i} + \frac{R_{fo}}{A_o}$$

Donde:

h_i: coeficiente de transferencia de calor por conveccion del lado de los tubos

h_o:coeficiente de transferencia de calor por conveccion de lado de la coraza

A_i:Área de transferencia de calor en el lado de los tubos

A_o:Área de transferencia de calor en el lado de la coraza

R_{tubo}:Resistencia termica por conducción de los tubos

Rfi: Factor de ensuciamiento en el lado de los tubos

R_{fo}: Factor de ensuciamiento en el lado de la coraza

Como siguiente paso, será necesario el cálculo de ambos coeficientes de transferencia de calor por convección, para esto, se llevará a cabo el siguiente procedimiento:

Se calcularán las velocidades de entrada de ambos fluidos:

$$vel = \frac{\dot{m}}{\rho \times A_{tr}}$$

ρ: Densidad del fluido $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

A_{tr}: Área transversal de ingreso del fluido $[m^2]$

$\dot{m}$: Flujo másico del fluido $\left[\frac{kg}{s}\right]$

Una vez calculadas estas velocidades, se puede calcular el número de Reynolds de ambos fluidos:

$$Re = \frac{D_h * vel}{\nu}$$

D_h: Diámetro hidráulico de ingreso del fluido $[m]$

vel: Velocidad de ingreso del fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$

ν: Viscosidad cinemática del fluido $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

Conocidos ambos números de Reynolds, el siguiente paso es determinar el número de Nusselt de ambos fluidos, este cálculo seguirá las siguientes condiciones:

Si $Re < 2100$:

$$Nu = 1.86\left(Re * Pr * \frac{D}{L}\right)^{0.5} * \mathrm{Pr}^{\frac{1}{3}}$$

Si $2100 \leq Re \leq 10000$

$$Nu = 0.116\left[Re^{2/3} - 125\right]\left[1 + \left(\frac{D}{L}\right)^{2/3}\right] Pr^{\frac{1}{3}}$$

Si $Re > 10000$

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{\frac{1}{3}}$$

Con esto somos capaces de calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección de ambos fluidos:

$$h = Nu * \frac{k}{D}$$

k: Conductividad térmica del fluido en estudio $\left[\frac{W}{m-K}\right]$

Con estos datos, ya somos capaces de determinar todo lo necesario en nuestro estudio, sin embargo, con miras a mejorar la precisión del modelo, se incluyó en estos cálculos el estudio del impacto de los deflectores en la transferencia de calor, a través del método de Bell-Dellaware, el cual postula que el coeficiente de transferencia de calor del lado de la coraza resulta:

$$h_{c,corregido} = h_{c,\sin deflectores} * J_c * J_l * J_s * J_b * J_r$$

Donde:

J_c: Factor de corrección para el corte deflector y el espaciado

J_l: Factor de corrección de fuga del deflector

J_b: Factor de corrección para el flujo de recirculación

J_s: F. corrección para la separación variable del deflector en las secciones de entrada y salida.

J_r: F. corrección para la acumulación de gradiente de temperatura adverso en el flujo laminar.

Los valores de cada uno de estos factores han sido extraídos de un estudio anterior que se le realizó al mismo intercambiador y son los siguientes:

Factor	Valor
J_c	1.05
J_l	1
J_b	1
J_s	0.7065
J_r	1

Tabla 2: Factores de corrección del coeficiente de transferencia de calor

Habiendo calculado todo esto, ya se tienen las variables necesarias para el cálculo de U, de NTU, efectividad, y razón de transferencia de calor a través de las fórmulas antes presentadas.

Finalmente, usando las siguientes formulas, podemos estimar la temperatura de salida de ambos fluidos:

$$T_{hot,out} = T_{hot,in} - \frac{\dot{Q}}{C_{hot}}$$

$$T_{cold,out} = T_{cold,in} + \frac{\dot{Q}}{C_{cold}}$$

8..2. Diseño del modelo en el software

Se construyó un sistema en Simulink a partir de bloques personalizados:

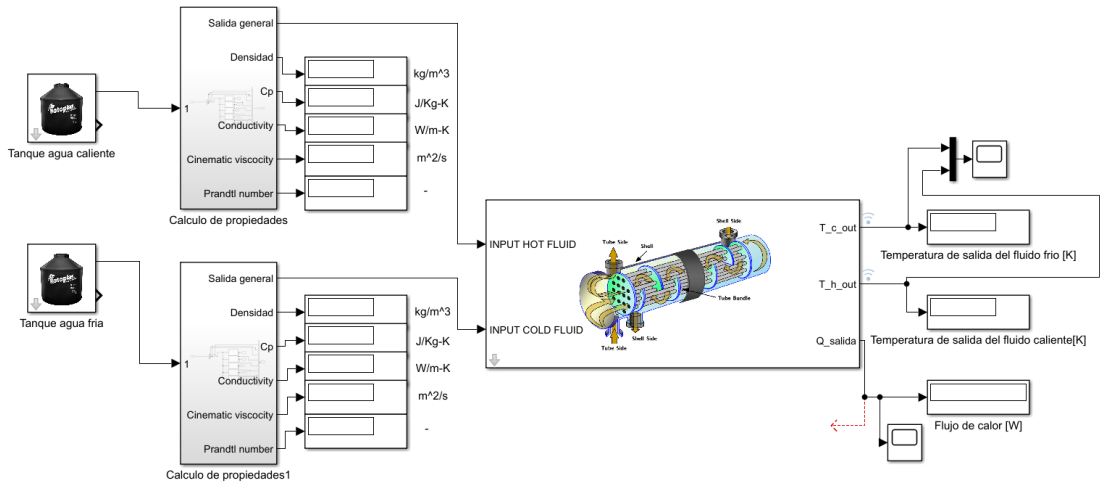


Imagen 20: Modelo desarrollado en Simulink (Fuente: Autoría propia)

A continuación, se explicará la construcción de cada bloque y la función que realiza

8..2.1. Bloque de tanque o depósito de agua:

Imagen 21: Bloque tanque de agua (Fuente: Autoría propia)

Este bloque fue construido con la intención de contener las características principales de fluido que entrará luego al intercambiador de calor, siendo estas la temperatura y el flujo masico, para esto se diseñó una interfaz donde podemos definir estas:

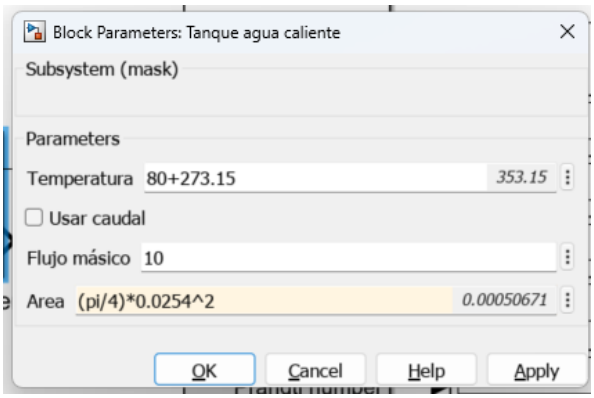


Imagen 22: Parámetros del bloque de tanque de agua (Fuente: Autoría propia)

Se agregó una opción para poder trabajar con caudal de entrada, en este caso, se calculará el flujo másico a partir del caudal y el área de entrada, la salida de este bloque lleva estas propiedades de fluido al siguiente bloque.

8..2.2. Bloque de cálculo de propiedades termodinámicas:

En el siguiente bloque, se definen las propiedades termodinámicas del fluido entrante del bloque anterior, las propiedades calculadas corresponden a las dadas en las tablas presentes en el libro Cengel de transferencia de calor y masa, y son calculadas solo en función a la temperatura.

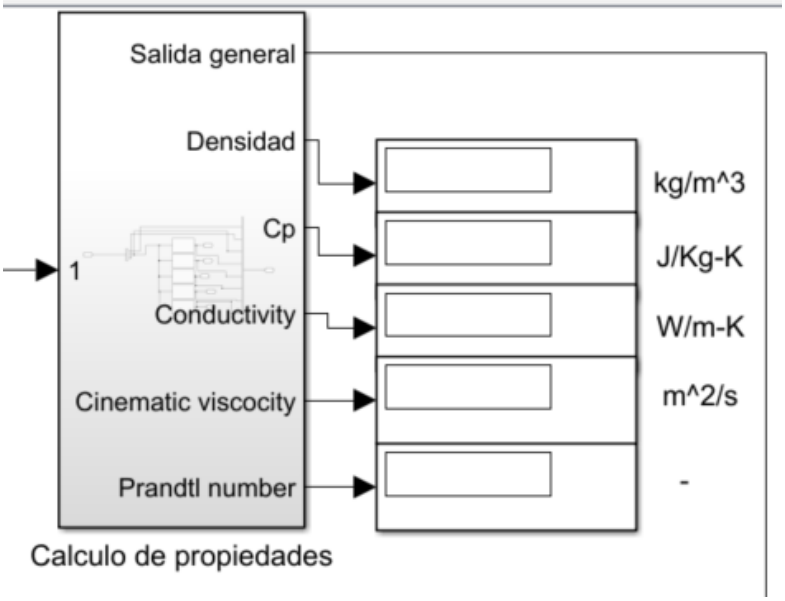


Imagen 23: Bloque de cálculo de propiedades (Fuente: Autoría propia)

Dentro de este bloque se ejecuta un subsistema que, a través del bloque llamado Matlab function, realiza el cálculo a través de la interpolación lineal en un vector que contiene valores de la propiedad en cuestión.

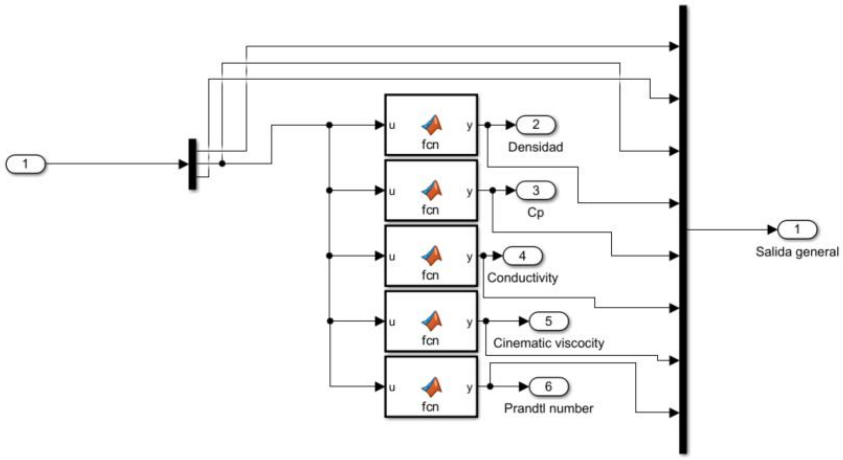


Imagen 24: Subsistema dentro del bloque de cálculo de propiedades (Fuente: Autoría propia)

Estos dos bloques antes mencionados se repiten 2 veces cada uno, ya que se ha usado los mismos tanto para fluido caliente y frío.

Una vez calculadas todas las propiedades de ambos fluidos, están listos para ingresar al bloque correspondiente al intercambiador de calor

8..2.3. Bloque intercambiador de calor

En este bloque se realizarán todos los cálculos que nos llevarán a estimar las temperaturas de salida de los fluidos.

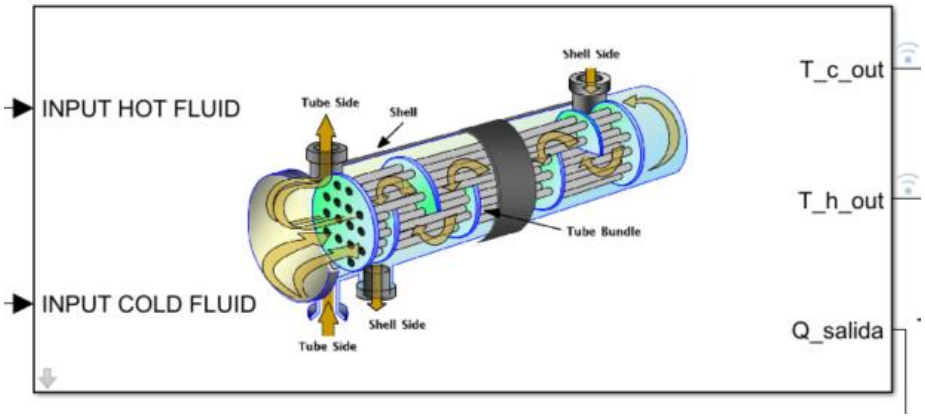


Imagen 25: Bloque intercambiador de calor (Fuente: Autoría propia)

Este bloque presenta dos entradas, una para cada fluido, a través de estas recibe la información de propiedades y flujo másico, dentro se realizan todas las operaciones matemáticas antes presentadas, en forma combinada de bloques y código, a continuación, se presenta el subsistema que se ejecuta dentro de este bloque:

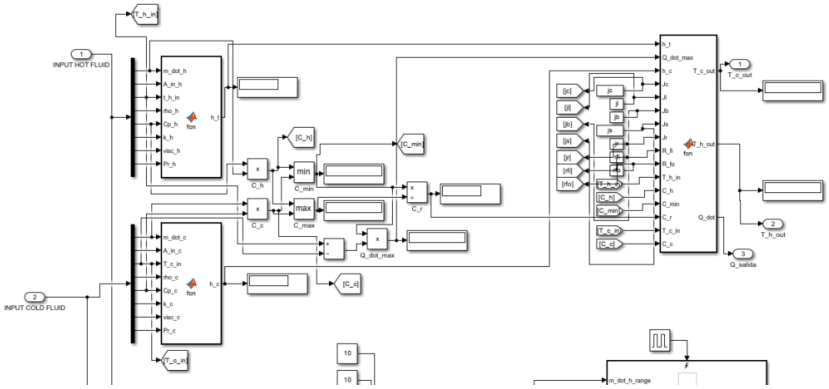


Imagen 26: Subsistema dentro del bloque intercambiador de calor (Fuente: Autoría propia)

Como primera etapa, se presentan dos bloques Matlab function, dentro de estos se ejecuta el código que, a través de los cálculos anteriormente presentados, calcula el coeficiente de transferencia de calor por convección de los fluidos, en paralelo se observa que, a través de bloque, se calculan los parámetros de C_{min}, C_{max}, c y $\dot{Q}_{max}$.

Finalmente, en el tercer bloque Matlab function, se reciben todos los valores calculados anteriormente, además de los factores de corrección y de ensuciamiento, dentro de este bloque, se ejecuta la parte final de los cálculos, donde se calculan variables como el NTU, la efectividad, las temperaturas de salida y la razón de transferencia de calor real.

Para la validación del modelo, se ejecutarán simulaciones con las siguientes características:

Fluido caliente	Agua
Fluido frío	Agua
Flujo masico de agua caliente	10kg/s
Flujo másico de agua fría	3kg/s
Temperatura del agua caliente	80 °C
Temperatura del agua fría	30°C

Tabla 3: Condiciones de trabajo para simulación 1 (elaboración propia)

Se establecen las condiciones iniciales:

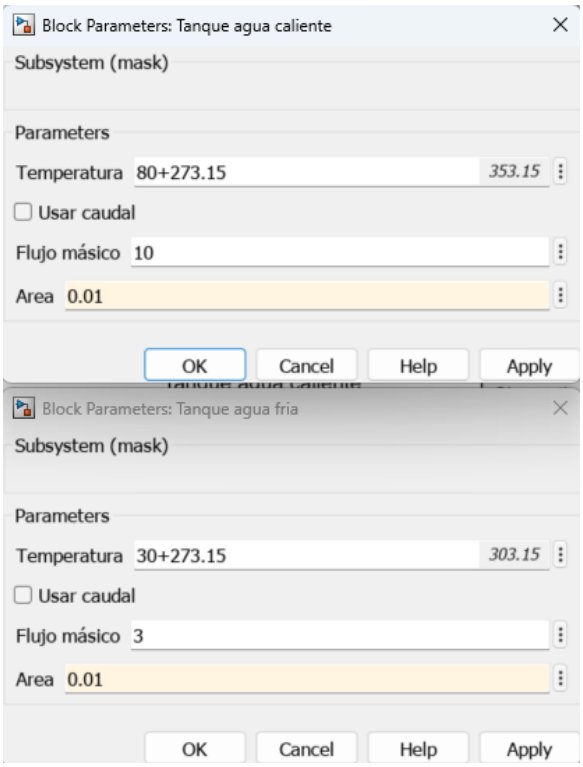


Imagen 27: Parámetros del bloque de tanque en la simulación 1(Fuente: Autoría propia)

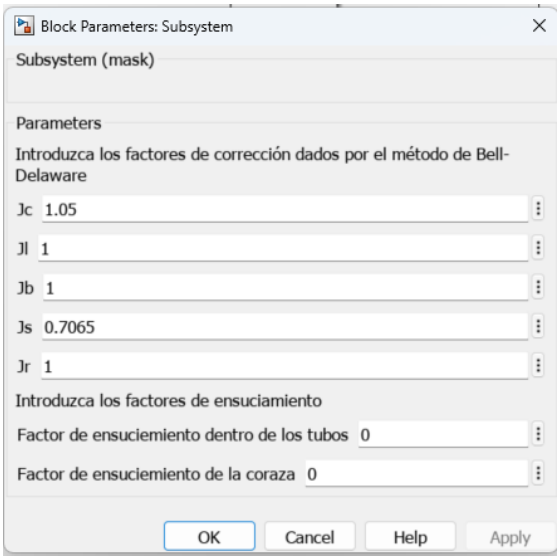


Imagen 28: Parámetros del bloque intercambiador de calor para la simulación 1 (Fuente: Autoría propia)

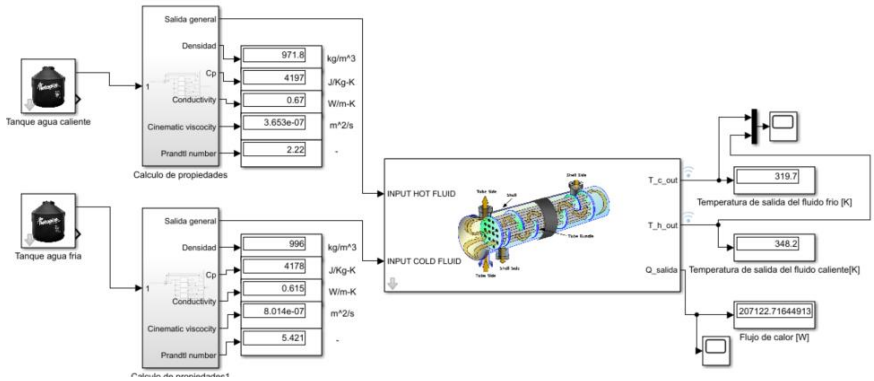


Imagen 29: Resultados de la simulación 1 (Fuente: Autoría propia)

Una vez ejecutada la simulación, se obtuvieron los siguientes resultados:

$$Temperatura\ de\ salida\ del\ agua\ caliente: 348.2K\ o\ 75.05\ °C$$
$$Temperatura\ de\ salida\ del\ agua\ fría: 319.7K\ o\ 46.55\ °C$$

Se comprueba la validez de estos resultados al ser bastante cercanos a los obtenidos en el estudio CFD simulado en SolidWorks.

Para un mejor estudio del comportamiento del intercambiador, se ha graficado la razón de transferencia de calor real en relación con diversos valores de flujo másico, tanto del fluido frío como el caliente, en este caso, desde 0 a 10kg/s.

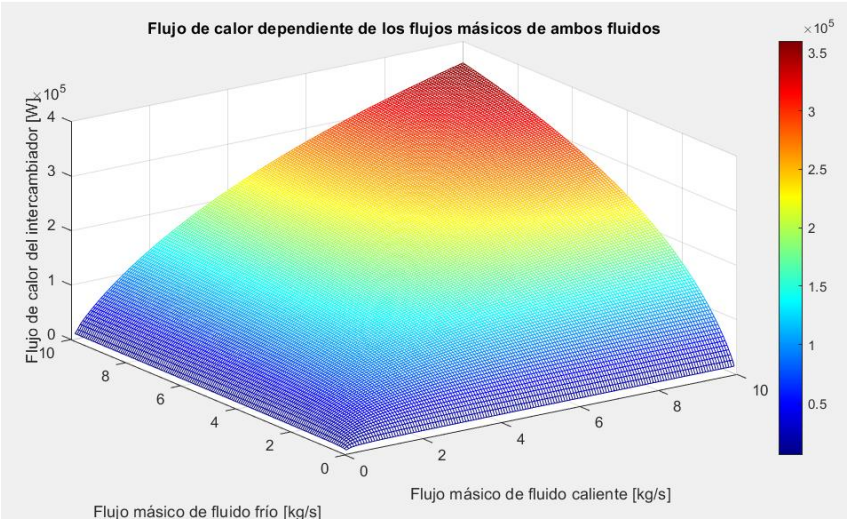


Imagen 30: Flujo de calor vs flujos másicos (Fuente: Autoría propia)

Observamos que el crecimiento de la razón de transferencia de calor es mayor para flujos masicos mayores en ambos fluidos, en el rango que estamos trabajando, la mayor transferencia de calor se logra cuando ambos flujos son 10 kg/s.

- ✓ **Plan de mantenimiento**

Con respecto al mantenimiento, y dada la gran oportunidad que nos brinda el uso de un gemelo digital en la industria, el plan de mantenimiento que se implementará será un Plan de Mantenimiento Preventivo basado en la condición.

Dicho Plan tiene como objetivo, aparte de brindar una guía y resumen de todos los componentes de los cuales está compuesta la máquina, además de su respectivo uso y manejo; también posee una característica única, la cual es la predicción de fallas.

Esta última incógnita es comúnmente deducible a través de pruebas continuas en ambientes controlados de la máquina, sin embargo y tal y como se explicó antes, para el presente trabajo se elaborará el anteriormente descrito plan de mantenimiento gracias al uso de un gemelo digital.

Para la elaboración del plan de mantenimiento se hará uso de un Aval de alta dirección, la cual divide los pasos de trabajo en:

8..1. División lógica de la planta

La planta instalada en el laboratorio de energía de la Universidad de Piura, donde se realizan las pruebas de funcionamiento de la maquina real es fácilmente resumible en la siguiente imagen:

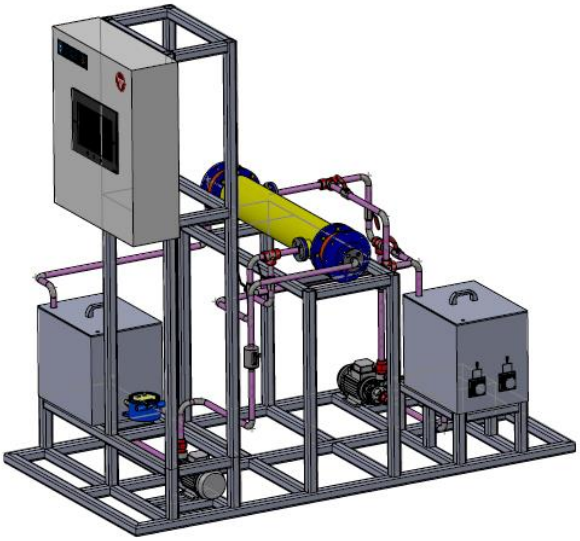


Imagen 31: Planta de pruebas del intercambiador de calor (Fuente: Ramírez, 2023, P. 53)

Gracias a ello podemos hacer la siguiente división lógica de planta:

Área	Nombre del activo	Numero de activos	Material
Control y automatización	Tablero de control 700x500x250mm	1	Acero inoxidable
	Resistencia 1200W	1	Acero inoxidable
	PLC Click Automation Direct	1	ABS
	HMI 4'' ETHERNET SIEMENS	1	ABS
	Variador de velocidad 220 VAC	1	ABS
Medición	Sensor de flujo FSA75-42-10H	2	Acero inoxidable+ ABS
	Sensor de presión prosense SPT25-20-0100A	2	Acero inoxidable+ ABS
	Sensor de Temperatura prosense ETS50N-100-1001	4	Acero inoxidable
Bombeo	Bomba EBARA PRA 106T 1HP	2	Compuesto
	Tubería Conduit ½''	20	Acero
	Uniones universales	12	Fundición gris
	Codos 1/2''	10	Fundición gris
	Tee 1/2''	2	Fundición gris
Intercambiador de calor	Carcasa	1	AISI 304
	Placa de tubos	1	Latón 70/30
	Tubos	167	Latón 70/30
	Deflectores	4	ABS

Tabla 4: Listado de equipos de planta (Fuente: Autoría propia)

8..2. Codificación

Para la codificación usaremos un sistema de clasificación concatenado, es decir primero el nombre del activo y posteriormente irán los grupos y subgrupos a los que pertenezca dicho activo, es importante señalar que los nombres de los activos y grupos aparte se encuentran en inglés, para asegurar la facilidad de los mismos, por ejemplo:

La bomba EBARA PRA 106T 1HP pertenece al grupo de bombeo de flujo y es de material fundición gris, entonces su sigla será:

P(Pump)-F(Flow System)-G(Gray fundition)

Habiendo explicado esto, procedemos a completar la tabla completa:

Nombre del activo	Sigla de nombre	Sigla de grupo	Sigla de material	Código completo
Tablero de control	C(Control panel)	C(Control System)	S(Stainless steel)	C-C-S
PLC Click Automation Direct	P(PLC)	C(Control System)	A(ABS)	P-C-A
Pantalla HMI 4'' ETHERNET SIEMENS	M(Monitor)	C(Control System)	A(ABS)	M-C-A
Variador de velocidad 220 VAC	S(SpeedVariator)	C(Control System)	A(ABS)	SV-C-A
Resistencia de 1200W	R(Resistor)	C(Control System)	S(Stainless Steel)	R-C-S
Sensor de flujo FSA75-42-10H	F(Flow sensor)	M(Measuring System)	C(Compound)	F-M-C
Sensor de presión prosense SPT25- 20-0100A	P(Pressure sensor)	M(Measuring System)	C(Compound)	P-M-C
Sensor de Temperatura prosense ETS50N-100-1001	T(Temperature sensor)	M(Measuring System)	S(Stainless steel)	T-M-S
Bomba EBARA PRA 106T 1HP	P(Pump)	F(Flow System)-	C(Compound)	P-F-C
Tubería Conduit ½''	T(Tube)	F(Flow System)-	G(Gray fundition)	T-F-G
Uniones universales	U(Union)	F(Flow System)-	G(Gray fundition)	U-F-G
Codos 1/2''	E(Elbow)	F(Flow System)-	G(Gray fundition)	E-F-G
Tee 1/2''	T(Tee)	F(Flow System)-	G(Gray fundition)	T-F-G
Carcasa	Q(Quiver)	HE(Heat Exchanger)	A(AISI 304)	C-HE-A
Placa de tubos	P(Plate)	HE(Heat Exchanger)	L(Latón 70/30)	P-HE-L
Tubos	T(Tubes)	HE(Heat Exchanger)	L(Latón 70/30)	T-HE-L
Deflectores	D(Deflectors)	HE(Heat Exchanger)	A(ABS)	D-HE-A

Tabla 5: Codificación de los activos (Fuente: Elaboración propia)

8..3. Inventario de activos y repuestos

Actualmente se cuenta con 0 repuestos para todas las piezas, pues aún se encuentra en prueba la máquina de estudio del presente trabajo, Intercambiador de calor, sin embargo, no hay un gran problema respecto a ello, pues los más propensos a fallas: las tuberías, codos y demás ítems del sistema de flujo o sistema de bombeo, son fácilmente reemplazables, pues existen sus repuestos en el mercado local.

Código del activo	Numero de activos en funcionamiento	Numero de activos en almacén
C-C-S	1	0
P-C-A	1	0
M-C-A	1	0
SV-C-A	1	0
R-C-S	0	0
F-M-C	2	0
P-M-C	2	0
T-M-S	4	0
P-F-G	2	0
T-F-G	20	0
U-F-G	12	0
E-F-G	10	0
T-F-G	2	0
C-HE-A	1	0
P-HE-L	1	0
T-HE-L	167	0
D-HE-A	4	0

Tabla 6: Inventario de activos en operación y de repuesto (Fuente: Elaboración propia)

8..4. Fichas técnicas y manuales de usuarios de los equipos

En el presente capitulo se colocarán las fichas técnicas y manuales de usuarios de los equipos más importantes, estos involucran en su gran mayoría los componentes de carácter electrónico y la bomba.

Ficha técnica de la Bomba EBARA PRA 106T 1HP

CENTRIFUGAL PUMPS

PRA

SPECIFICATIONS

60Hz

Rev. C

PUMP			
Liquid Handled	Type of liquid		Clean water
	Temperature	[°C]	min. +5 max. +80
Maximum working pressure		[MPa]	0.6 (PRA 056) 0.75 (PRA 086) 1.2 (PRA 106-156-206)
Construction	Impeller		Peripheral turbine type
	Shaft seal type		Mechanical seal
	Bearing		Sealed ball bearing
Pipe Connection	Suction	[inch]	G 1 UNI ISO 228
	Discharge	[inch]	G 1 UNI ISO 228
Material	Casing		Cast iron
	Impeller		Brass
	Shaft seal		Ceramic/Carbon/NBR
	Shaft		Carbon steel - AISI 303 (wet extension)
	Bracket		Cast iron
Applicable standard of test			ISO 9906:2012 - Grade 3B

MOTOR				
Type			Electric - TEFC	
			Single Phase	Three Phase
Efficiency level			-	- from 0.37 kW up to 0.6 kW - from 0.75 kW up to 1.5 kW IE3* from 0.75 kW up to 1.5 kW (*only for 460V)
No. of Poles			2	
Rotation speed		[min^{-1}]	≈ 3350	
Insulation Class			F	
Protection degree			IP 44	
Power rating		[kW]	0.37 ÷ 1.5	
		[HP]	0.5 ÷ 2	
Frequency		[Hz]	60	
Voltage		[V]	110-115 ±6% 220-230 ±6%	220/380 –6% +10% (from 0.37 kW up to 0.6 kW) 220/380 ±10% (from 0.75 kW up to 1.5 kW) 220/380-460 ±10% (IE3* from 0.75 kW up to 1.5 kW)
Capacitor			Built in	-
Over load protection			Built in	Provided by the user
Casing material			Aluminium	
Base material			Aluminium	
Dimensions of cable entry			PG 11 - PG 13.5 - M16x1.5 - M20x1.5 (see DIMENSIONS TABLE page 400)	

*only for 460 V

CENTRIFUGAL PUMPS

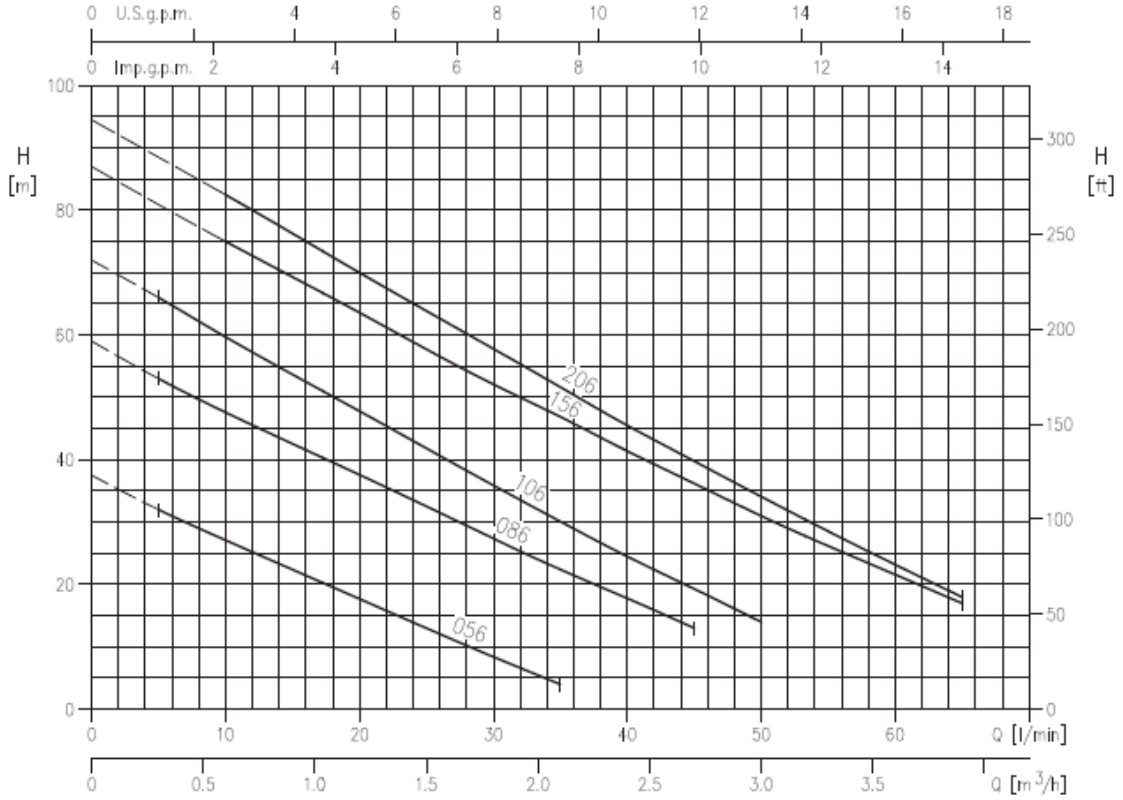
PRA

PERFORMANCE RANGE and SELECTION CHART

60Hz

Rev. C

PERFORMANCE RANGE



SELECTION CHART

Pump type		Power		Q=Capacity										
				l/min. 0	5	10	20	30	35	40	45	50	60	65
Single Phase	Three Phase	[kW]	[HP]	m³/h 0	0,3	0,6	1,2	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,6	3,9
				H=Total manometric head in meters										
PRA 056 M	PRA 056 T	0,37	0,5	37,5	32	27	17,7	8,4	4	-	-	-	-	-
PRA 086 M	PRA 086 T	0,6	0,8	59	53	48	37,6	27,5	22,2	17,9	13	-	-	-
PRA 106 M	PRA 106 T	0,75	1	72	66	60	48	35,9	30,1	24,5	19,4	14	-	-
PRA 156 M	PRA 156 T	1,1	1,5	87	-	75	63,5	52	47	41,5	36,2	31	21,8	17
-	PRA 206 T	1,5	2,0	94,5	-	82,5	70	57,8	51,6	45,5	39,8	34,1	23,2	18

CENTRIFUGAL PUMPS

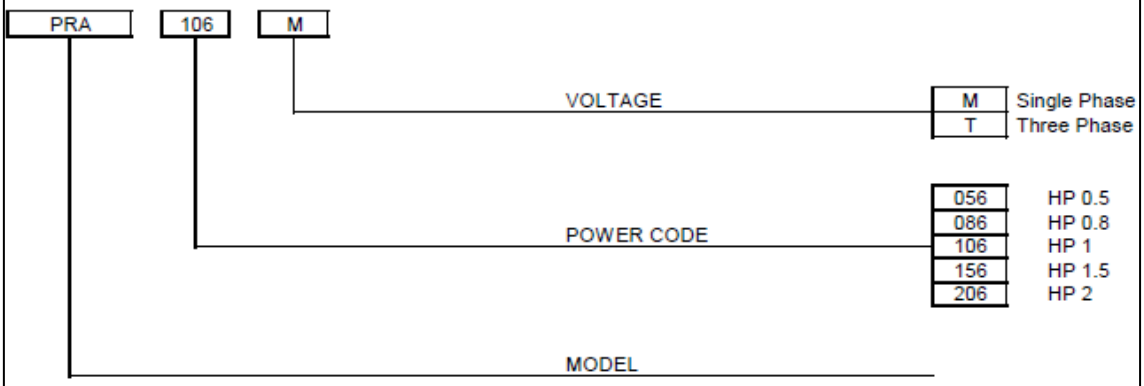
PRA

TYPE KEY and CURVES SPECIFICATIONS

60Hz

Rev. C

TYPE KEY



CURVES SPECIFICATIONS

The specifications below qualify the curves shown on the following pages.

Tolerances according to ISO 9906:2012 - Grade 3B.
The curves refer to effective speed of asynchronous motors at 60 Hz, 2 poles.
Measurements were carried out with clean water at 20℃ of temperature and with a kinematic viscosity of ν = 1 mm^2/s (1 cSt)
The continuous curves indicate the recommended working range. The dotted curve is only a guide.
In order to avoid the risk of over-heating, the pumps should not be used at a flow rate below 10% of best efficiency point.

Symbols explanation:

Q = volume flow rate
H = total head

CENTRIFUGAL PUMPS

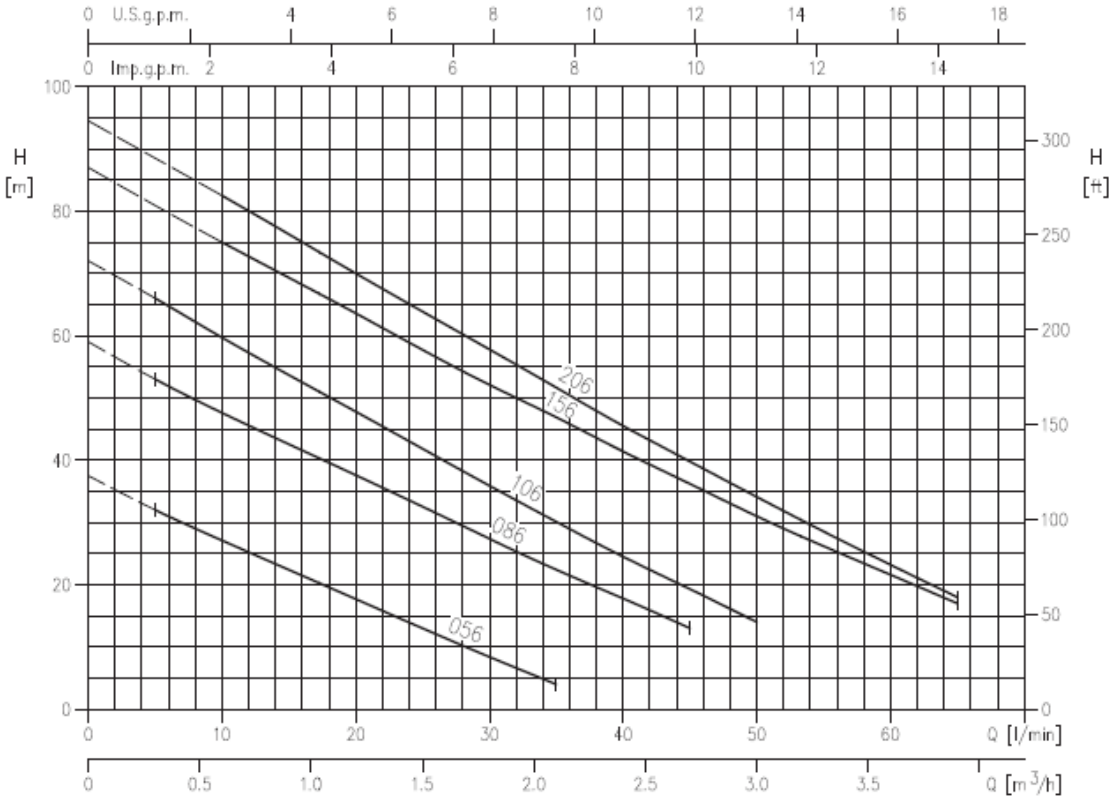
PRA

PERFORMANCE CURVES

60Hz

Rev. C

PRA 056 (0.37 kW) - Impeller dimension = 57 mm
PRA 086 (0.6 kW) - Impeller dimension = 67 mm
PRA 106 (0.75 kW) - Impeller dimension = 68 mm
PRA 156 (1.1 kW) - Impeller dimension = 74 mm
PRA 206 (1.5 kW) - Impeller dimension = 74.5 mm



Rotation speed ≈ 3350 min^{-1}
Test standard: ISO 9906:2012 - Grade 3B

CENTRIFUGAL PUMPS

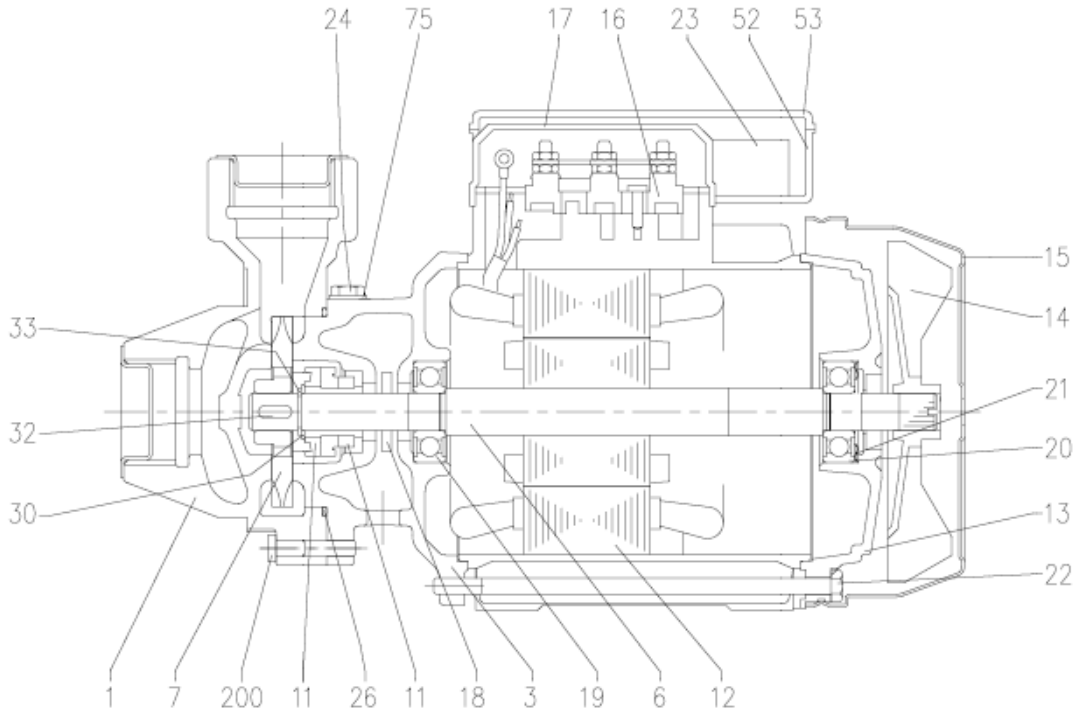
PRA

CONSTRUCTIONS

60Hz

Rev. C

SECTIONAL VIEW

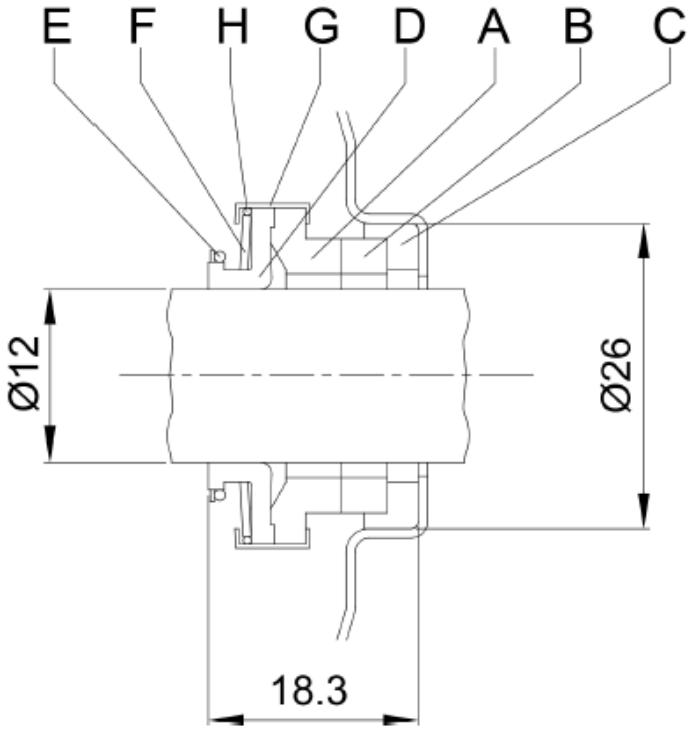


N°	PART NAME	MATERIAL	Q.TY
1	Casing	Cast Iron	1
3	Motor bracket	Cast Iron	1
6	Shaft with rotor	[1]	1
7	Impeller	Brass	1
11	Mechanical seal [2]	Carbon/Ceramic/NBR	1
12	Motor frame with stator	-	1
13	Motor cover	Aluminium	1
14	Fan	PP	1
15	Fan cover	Fe P04 Zincate	1
16	Terminal box	-	1
17	Terminal box cover [3]	Aluminium	1
18	Splash ring	NBR	1
19	Pump side ball bearing	-	1

N°	PART NAME	MATERIAL	Q.TY
20	Fan side ball bearing	-	1
21	Adjusting ring	Steel C70	1
22	Tie rod	Fe 42 Zincate	4
23	Capacitor [4]	-	1
24	Priming plug	Brass	1
26	O-Ring	NBR	1
30	Washer	AISI 304	1
32	Key	AISI 316	1
33	Seeger ring	AISI 304	1
52	Capacitor box [4]	ABS class V-0	1
53	Capacitor box cover [4]	ABS class V-0	1
75	Washer	Aluminium	1
200	Screw	Zincate Steel Cl. 8.8 ISO 898-1	3

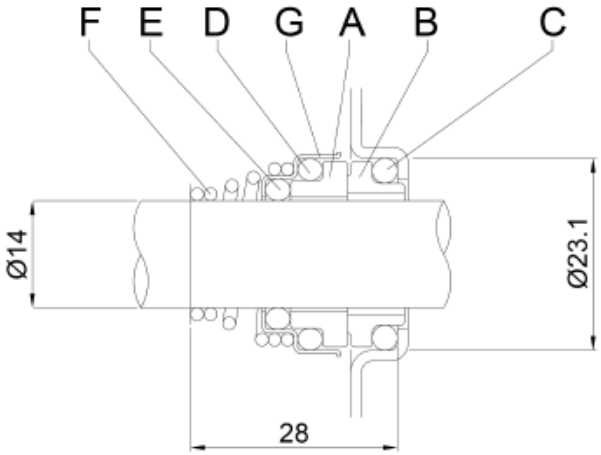
[1] Material: Carbon steel (1.0736) for version PRA 056
AISI 303 (wet extension) for the other version
[2] See **MECHANICAL SEAL** page 301-302
[3] Only for Three phase
[4] Only for Single phase

MECHANICAL SEAL
(UP TO 0.75 kW)



REF	PART NAME	MATERIAL Standard version
A	Rotary seal ring	carbon graphite
B	Stationary seal ring	ceramic
C	Gasket	NBR
D	Bellows	NBR
E	Ring	AISI 304
F	Self driving spring	AISI 304
G	Frame	AISI 304
H	Retainer ring	AISI 304

MECHANICAL SEAL
(1.1 kW AND ABOVE)



REF	PART NAME	MATERIAL Standard version
A	Rotary seal ring	ceramic
B	Stationary seal ring	carbon graphite
C	O Ring	NBR
D	O Ring	NBR
E	O Ring	NBR
F	Self driving spring	AISI 316
G	Frame	AISI 304

BEARINGS

Pump Type		Ball bearing			
		Pump side		Fan side	
Single phase	Three phase		(*)		(*)
PRA 056 M	PRA 056 T	6201 2RSH	-	6201 2RSH	-
PRA 086 M	PRA 086 T	6202 2RSH	-	6202 2RSH	-
PRA 106 M	PRA 106 T	6202 2RSH	6202-ZZ C3	6202 2RSH	6202-ZZ C3
PRA 156 M	PRA 156 T	6204 2RSH	6204-ZZ C3	6203 2RSH	6203-ZZ C3
-	PRA 206 T	6204 2RSH	6204-ZZ C3	6203 2RSH	6203-ZZ C3

(*) Only for IE3 Motors

CENTRIFUGAL PUMPS

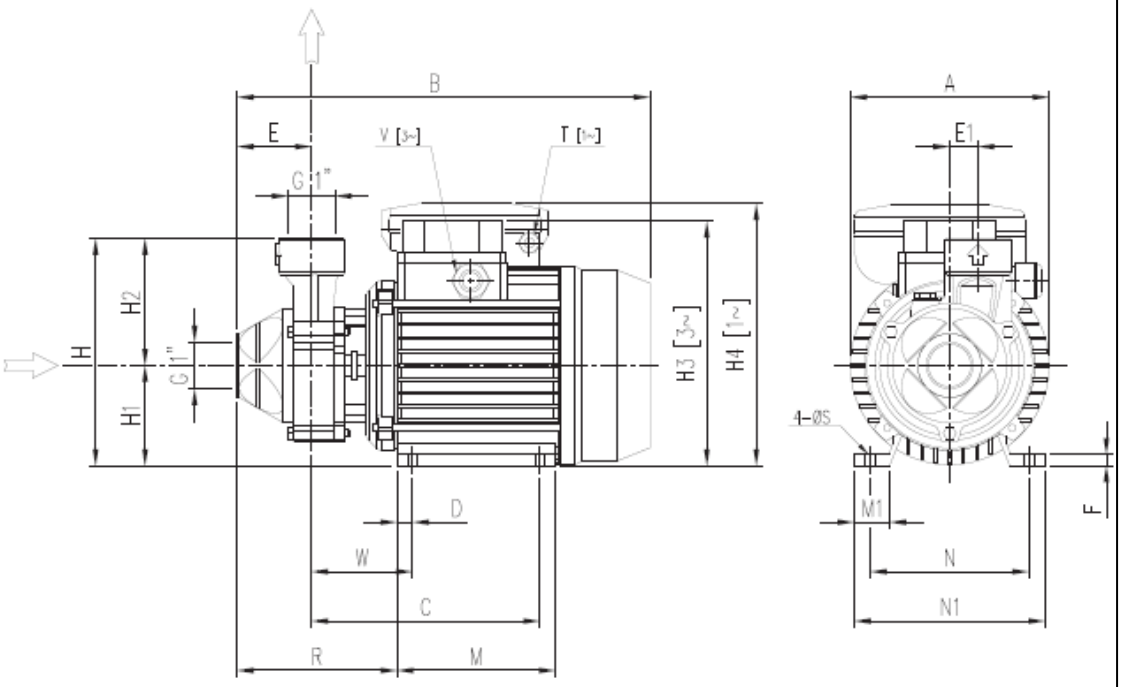
PRA

DIMENSIONS and WEIGHT

60Hz

Rev. C

PUMP



Pump type	Dimensions [mm] A	B	B (*)	C	D	E	E1	F	H	H1	H2	H4 [1~]	H3 [3~]	M	M1	N	N1	R	T [1~]	V [3~]	V (*)	W	O	Weight [kg]	Weight (*)
PRA 056 M	125	263,5	-	151	10	50	20	7	143	63	80	160	-	100	22	100	120	111	PG11	-	-	71	7	5,6	-
PRA 056 T	125	265,5	-	151	10	50	20	7	143	63	80	-	156	100	22	100	120	111	-	PG11	-	71	7	5,6	-
PRA 086 M	141	290,5	-	161,3	11	52,7	20	9	161	71	90	178	-	112	25	112	135	113	PG11	-	-	71,3	7	9,2	-
PRA 086 T	141	292	-	161,3	11	52,7	20	8	161	71	90	-	172	112	25	112	135	113	-	PG11	-	71,3	7	9,2	-
PRA 106 M	141	290,5	-	161,3	11	52,7	20	9	161	71	90	178	-	112	25	112	135	113	PG11	-	-	71,3	7	9,7	-
PRA 106 T	141	292	292	161,3	11	52,7	20	8	161	71	90	-	172	112	25	112	135	113	-	PG11	M16x1.5	71,3	7	9,7	9,7
PRA 156 M	160	330,5	-	191	12	56	20	10	175	80	95	212	-	124	26	125	152	135	PG13,5	-	-	91	9	14,5	-
PRA 156 T	160	335	360	191	12	56	20	10	175	80	95	-	199	124	26	125	152	135	-	PG11	M20x1.5	91	9	14,5	14,5
PRA 206 T	160	348	361	191	12	56	20	10	175	80	95	-	199	124	26	125	152	135	-	PG11	M20x1.5	91	9	15,8	15,8

[1~] Single Phase
[3~] Three Phase
(*) Only for IE3 Motors

CENTRIFUGAL PUMPS

PRA

TECHNICAL DATA

60Hz

Rev. C

MOTOR DATA

Pump type		Power		Efficiency		Capacitor				Efficiency (% load) Three phase (380 V) η %			Efficiency (% load) Three phase (460 V) η %			Input [kW]		Full load current [A]					Locked rotor current [A]				
Single Phase	Three Phase	[kW]	[HP]	Single Phase	Three Phase	110-115 V [µF]	110-115 V [V]	220-230 V [µF]	220-230 V [V]	50%	75%	100%	50%	75%	100%	Single Phase	Three Phase	Single Phase 110-115 V	Single Phase 220-230 V	Three Phase 220 V	Three Phase 380 V	Three Phase 460 V	Single Phase 110-115 V	Single Phase 220-230 V	Three Phase 220 V	Three Phase 380 V	Three Phase 460 V
PRA 056 M	PRA 056 T	0,37	0,5	-	-	31,5	250	8	450	-	-	-	-	-	-	0,58	0,56	5,5	2,8	1,9	1,1	-	15,5	7,55	5,5	3,2	-
PRA 086 M	PRA 086 T	0,6	0,8	-	-	60	250	14	450	-	-	-	-	-	-	1,37	1,33	12,5	6,3	4,0	2,3	-	48,8	23,2	16,4	9,5	-
PRA 106 M	PRA 106 T	0,75	1,0	-	-	60	250	20	450	77,2	79,5	79,3	76,6	80,9	82,3	1,54	1,00	15,3	7,1	2,9	1,7	-	52,0	26,0	20,6	11,9	-
-	PRA 106 T	0,75	1,0	-	IE3*	-	-	-	-	80,7	81,9	81,3	78,4	81,6	83,1	-	0,90	-	-	2,8	1,6	1,5	-	-	16,9	9,7	11,8
PRA 156 M	PRA 156 T	1,1	1,5	-	-	-	-	35	450	78,3	80,4	81,0	76,5	81,3	83,4	2,20	2,00	-	10,4	5,7	3,3	-	-	69,0	38,8	22,4	-
-	PRA 156 T	1,1	1,5	-	IE3*	-	-	-	-	84,2	84,7	84,5	83,2	84,7	85,7	-	1,75	-	-	5,3	3,1	2,9	-	-	40,2	23,2	28,1
-	PRA 206 T	1,5	2,0	-	-	-	-	-	-	82,4	83,0	82,2	79,5	82,9	83,8	-	2,90	-	-	8,1	4,7	-	-	-	54,4	31,4	-
-	PRA 206 T	1,5	2,0	-	IE3*	-	-	-	-	86,5	86,8	86,2	86,9	87,8	87,4	-	2,48	-	-	7,5	4,3	4,1	-	-	55,7	32,2	38,9

* only for 460 V

Ficha técnica del sensor de flujo (F-M-C)

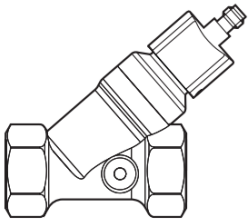
prosense®

CE

Operating instructions
ProSense Flow Transmitters

FSA75-42-6H
FSA75-42-10H
FSA1-42-27H

80008232 / 00 03 / 2015



by Automationdirect.com

Contents

1 Preliminary note 2
2 Safety instructions 2
3 Functions and features 3
4 Function 3
5 Installation 4
6 Electrical connection 4
7 Scale drawing 5
8 Technical data 5
9 Maintenance, repair, disposal 7

1 Preliminary note

▶ Instructions
> Reaction, result
→ Cross-reference

Important note
Non-compliance can result in malfunction or interference.

Information
Supplementary note.

2 Safety instructions

- Please read this document prior to set-up of the unit. Ensure that the product is suitable for your application without any restrictions.
- Improper or non-intended use may lead to malfunctions of the unit or to unwanted effects in your application. That is why installation, electrical connection, set-up, operation and maintenance of the unit must only be carried out by qualified personnel authorised by the machine operator.
- In order to guarantee the correct condition of the device for the operating time the device must only be used in media with which the wetted parts are compatible (→ Technical data).

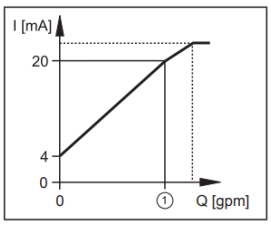
- The responsibility whether the measurement devices are suitable for the respective application lies with the operator. The manufacturer assumes no liability for consequences of misuse by the operator. Improper installation and use of the devices result in a loss of the warranty claims.
- During installation or in case of a fault (housing damage) media under high pressure or hot media can leak from the system.
  - ▶ Install the unit according to the applicable rules and regulations.
  - ▶ Ensure that the system is free of pressure during installation.
  - ▶ Ensure that no media can leak at the mounting location during installation.
  - ▶ Equip the unit with suitable protection (e.g. cover) to avoid hazard to personnel from leaking media.

3 Functions and features

The unit monitors liquid media (water, glycol solutions, industrial oils, coolants).

It detects the flow rate on the principle of differential pressure and converts it into an analog output signal (4...20 mA).

4 Function



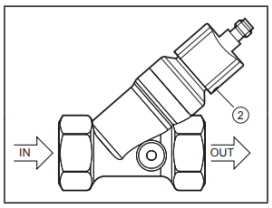
1: final value of the measuring range

The analog signal for water (20 °C) is linear from 4 mA (= no flow) to 20 mA (= final value of the measuring range → Technical Data).

For an output signal > 20 mA the flow rate is above the final value of the measuring range.

5 Installation

Loosening the socket head screw (2) and moving the cap does not change the setting of the sensor. However, moving the cap may be useful to read the label.



▶ Insert the unit into the pipe according to the direction of flow (arrow) and tighten.

IN = inlet
OUT = outlet

Baffled pipes on the sensor's inlet or outlet side are not necessary.

▶ Ferromagnetic materials in the surrounding environment should be at least 50 mm from the housing of the unit. Ferromagnetic piping may be used on the inlet and outlet connections.

▶ Do not operate the unit in the vicinity of magnetic constant and alternating fields (e.g. welding systems).

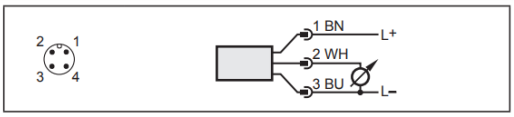
▶ If the sensors are installed side by side, observe a minimum distance of 50 mm between the sensor axes.

6 Electrical connection

The unit must be connected by a qualified electrician.
The national and international regulations for the installation of electrical equipment must be adhered to.
Voltage supply according to EN 50178, SELV (safety extra-low voltage), PELV (protected extra-low voltage).

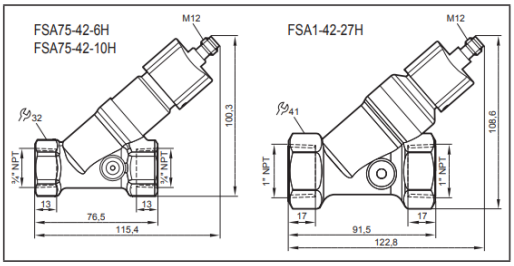
▶ Disconnect power.

▶ Connect the unit as follows:



1 = BN (brown), 2 = WH (white), 3 = BU (blue); Colors to DIN EN 60947-5-2

7 Scale drawing



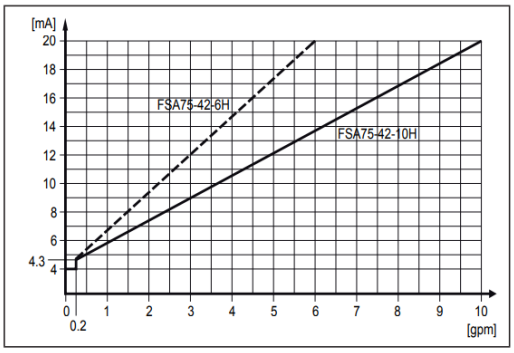
8 Technical data

	FSA75-42-6H	FSA75-42-10H	FSA1-42-27H
Measuring range	0...6.0 gpm	0...10 gpm	0...27 gpm
Max. flow rate	26.4 gpm	26.4 gpm	52.8 gpm
Process connection	3/4" FNPT	3/4" FNPT	1" FNPT
Operating voltage	18...32 VDC (SELV / PELV)		
Output function	4...20 mA		
Short-circuit protection	yes		
Reverse polarity protection	yes		
Overload protection	yes		
Maximum load	500 Ohm		
Current consumption	< 35 mA		

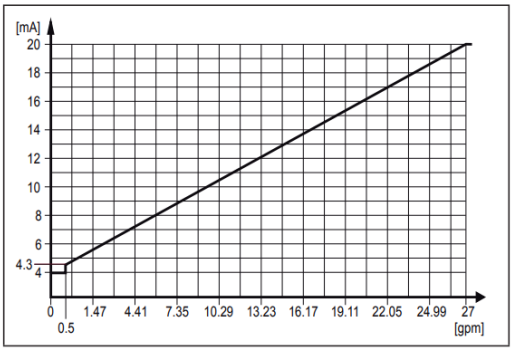
	FSA75-42-6H	FSA75-42-10H	FSA1-42-27H
Repeatability *	± 1 % of the final value		
Accuracy *	± 5 % of the final value		
Pressure loss (dP) / flow rate *	0.7 psi / 0.2 gpm 2.3 psi / 6.0 gpm		1.5 psi / 0.5 gpm 7.3 psi / 27 gpm
Housing materials	Brass chemically nickel-plated; PP; stainless steel 316L / 1.4404; aluminium anodised; PA		
Materials (wetted parts)	Stainless steel 316 / 1.4401; Brass chemically nickel-plated; PP; PPS		
Protection	IP 67 III		
Cycles min.	10 million		
Ambient temperature	32...140 °F (0...60 °C)		
Pressure rating	362 psi		

* For water 68°F (20°C)

Characteristics of the analog output FSA75-42-6H and FSA75-42-10H:



Characteristics of the analog output FSA1-42-27H:



9 Maintenance, repair, disposal

If used correctly, no maintenance and repair measures are necessary.

In case of strongly polluted media: mount a filter before the inlet (IN).

Recommendation: use a 200-micron filter.

After use dispose of the unit in an environmentally friendly way in accordance with the applicable national regulations.

More information at www.automationdirect.com

Ficha técnica del sensor de presión (P-F-C)

proSense SPT25 Series Pressure Transmitters

The ProSense SPT25 pressure transmitter series is engineered to meet many industrial, commercial, and OEM pressure measurement applications. The all stainless steel welded thin film sensing element provides very fast response time and is compatible with many different media sensing applications. With a robust design resistant to vibration, shock, and EMI/RFI, the SPT25 series provides high accuracy over a wide compensated temperature range. Pressure sensing ranges from vacuum to 5000 psig are available along with a ¼ inch NPT male threaded process connection. Choose from linear outputs of 4-20 mA or 0-10VDC with electrical connections of either a DIN 175301-803C L-connector or 6.6 foot (2 m) integral shielded cable.

Features

- All stainless steel welded sensing element
- Fast response time
- Pressure sensing ranges from vacuum to 5000 psig
- 1/4 inch NPT male threaded process connection
- Output options: 4-20 mA or 0-10 VDC
- Integral 6.6 foot shielded cable or DIN form C electrical connections
- Made in the USA
- CE marked
- 3-year warranty

Applications

- Process control & automation
- Pump & compressor control
- Hydraulic systems
- Pneumatic systems
- Engine monitoring
- Refrigeration equipment
- Presses
- Machine tools

Click on the thumbnail or go to https://www.automationdirect.com/VID-PR-0001 for a short video on Pro-Sense Air Differential and Pressure Transmitters

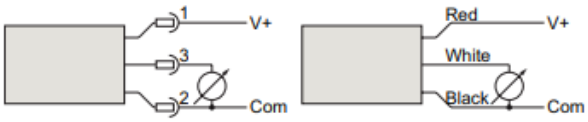
ProSense SPT25 Series Pressure Transmitters (Shielded Cable)

Part Number	Description	Electrical Connection	Input Voltage	Wt(lb)	Price
SPT25-20-V30A	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, -14.7 vacuum to 30 psig range, 1/4" NPT male port	Integral 6.6 ft (2m) shielded cable	9 - 36 VDC	0.38	$153.00
SPT25-20-0030A	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 30 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-20-0060A	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 60 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-20-0100A	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 100 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-20-0150A	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 150 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-20-0200A	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 200 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-20-0300A	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 300 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-20-0500A	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 500 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-20-1000A	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 1000 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-20-1500A	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 1500 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-20-2000A	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 2000 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-20-3000A	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 3000 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-20-5000A	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 5000 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-10-V30A	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, -14.7 vacuum to 30 psig range, 1/4" NPT male port		14 - 36 VDC		$153.00
SPT25-10-0030A	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 30 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-10-0060A	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 60 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-10-0100A	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 100 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-10-0150A	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 150 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-10-0200A	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 200 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-10-0300A	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 300 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-10-0500A	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 500 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-10-1000A	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 1000 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-10-1500A	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 1500 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-10-2000A	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 2000 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-10-3000A	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 3000 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00
SPT25-10-5000A	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 5000 psig range, 1/4" NPT male port				$153.00

ProSense SPT25 Series Pressure Transmitters

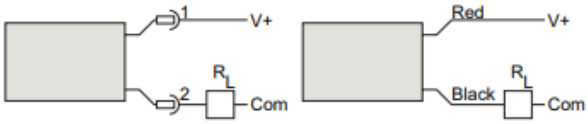
ProSense SPT25 Series Pressure Transmitters (DIN Connector)					
Part Number	Description	Electrical Connection	Input Voltage	Wt(lb)	Price
SPT25-20-V30D	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, -14.7 vacuum to 30 psig range, 1/4" NPT male port	DIN 175301-803C L-connector	9 - 36 VDC	0.30	$147.00
SPT25-20-0030D	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 30 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-20-0060D	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 60 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-20-0100D	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 100 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-20-0150D	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 150 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-20-0200D	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 200 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-20-0300D	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 300 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-20-0500D	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 500 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-20-1000D	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 1000 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-20-1500D	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 1500 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-20-2000D	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 2000 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-20-3000D	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 3000 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-20-5000D	Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 5000 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-10-V30D	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, -14.7 vacuum to 30 psig range, 1/4" NPT male port		14 - 36 VDC		$147.00
SPT25-10-0030D	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 30 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-10-0060D	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 60 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-10-0100D	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 100 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-10-0150D	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 150 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-10-0200D	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 200 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-10-0300D	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 300 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-10-0500D	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 500 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-10-1000D	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 1000 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-10-1500D	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 1500 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-10-2000D	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 2000 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-10-3000D	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 3000 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00
SPT25-10-5000D	Pressure transmitter, 0 to 10 V output, 0 to 5000 psig range, 1/4" NPT male port				$147.00

0 to 10 VDC Output Wiring Diagram



With DIN Connector With Integral Cable

4 to 20 mA Output Wiring Diagrams



With DIN Connector With Integral Cable

Shielded Cable Models Wire Designation		
Wire Color	0 - 10 VDC Output	4 - 20 mA Output
Red	V +	V +
Black	Com	Output
White	Output	None
Bare*	Shield Drain Wire	Shield Drain Wire

** Where shielded wiring is being used; Connect the drain wire to the guard terminal on the read out device or measuring instrument if available. In all other cases connect to the power supply negative terminal.*

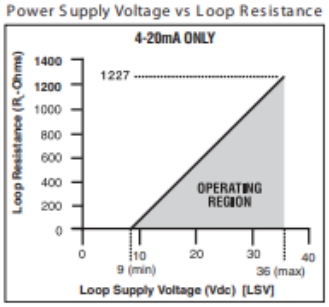
DIN Form C Models Pin Designation		
Pin No.	0 - 10 VDC Output	4 - 20 mA Output
1	V+	V+
2	Com	Output
3	Output	None
4	Case Ground	Case Ground

ProSense SPT25 Series Pressure Transmitters

ProSense SPT25 Series General Specifications	
Housing Material	20% Glass Reinforced Nylon, Fire retardant to UL94 V1 / 304 Series Stainless steel
*Materials (wetted parts)***	304 Series Stainless steel / 17-4PH Stainless Steel
Operating Temperature	–40 to 257°F (–40 to 125°C)
Medium Temperature	–40 to 257°F (–40 to 125°C)
Storage Temperature	–40 to 257°F (–40 to 125°C)
Protection	IP 67 for cabled models IP 65 For DIN connector models
*Accuracy**	± 0.50% of full range
Temperature Coefficient	0.15% of full range / 10°F (0.25% of full range / 10°C)
Reference Temperature	70°F ± 1°F (21°C ± 1°C)
Compensated Temperature	–4 to 185°F (–20 to 85°C)
Insulation Resistance	Greater than 100 megohms at 100 VDC
Shock Resistance	100 gs, 6 ms
Vibration Resistance	Random vibration (20 g) over temperature range (-40° to 125°C). Exceeds typical MIL. STD. requirements
Drop Test	Withstands 1 meter on concrete 3 axis
Response Time	Less than 1 msec
Warm-up time	Less than 500 msec
Position Effect	Less than ±0.01% span, typical
Insulation Breakdown Voltage	100 VAC
Reverse Polarity & Miswired Protected	Yes
Durability	Tested to 50 million cycles
Humidity	0 to 100% R.H., no effect
Stability	Less than ±0.25% full range / year
Agency Approvals	CE
**Note - Includes non-linearity, hysteresis & non-repeatability.*	
*** Not cleaned for oxygen service*	

ProSense SPT25 Series Technical Specifications	
Technical Specifications SPT25-20-xxxx	
Operating Voltage	9 – 36 VDC
Analog Output	4 – 20 mA
Maximum Load	Determine Maximum Loop Resistances $\frac{V_L - 9\ \text{VDC}}{0.022\ \text{amps}} = R_L$ For example [(24 VDC – 9 VDC) / 0.022 amps] = 681Ω
Technical Specifications SPT25-10-xxxx	
Operating Voltage	14 – 36 VDC
Current Consumption	4 mA
Minimum Load	10 kΩ

Power Supply Voltage vs Loop Resistance



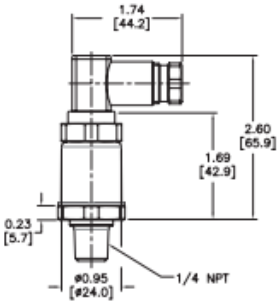
ProSense SPT25 Proof & Burst Pressures		
	Proof	*Burst*
500 psig & below	200% full scale	1000% full scale
1000 – 2000 psig	200% full scale	500% full scale
3000 psig	200% full scale	500% full scale
5000 psig	150% full scale	500% full scale

DIN Connector Specifications	
Number of contacts	3 + PE
Cable glands	PG 7
Conductor size max.	0.75 mm² / 18AWG
Type of termination	Screw
Suitable cables	4.5 mm to 6mm
Standard DIN	EN 175 301-803-C

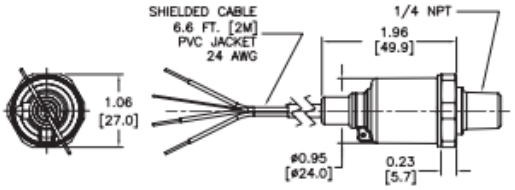
See our website www.AutomationDirect.com for complete Engineering drawings.

Dimensions

inches [mm]



DIN Connector Models



Shielded Cable Models

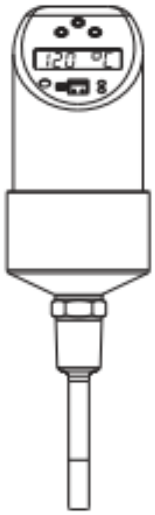
Ficha técnica del sensor de temperatura (T-F-S)

prosense®

AUTOMATIONDIRECT

ProSense ETS Series

Digital Temperature Sensors



ProSense ETS Series Digital Temperature Sensors				
Part Number	Measuring Range	Thread Size	Length	Output
ETS50N-30-1001	-58 to 302°F (-50 to 150°C)	1/2" MNPT	30mm	Output 1: switch PNP, N.O./N.C., selectable or 4-20 mA* Output 2: switch PNP, N.O./N.C., selectable or 4-20 mA*
ETS50N-50-1001			50mm	
ETS50N-100-1001			100mm	
ETS50N-150-1001			150mm	
ETS25N-30-1001		1/4" MNPT	30mm	
ETS25N-50-1001			50mm	
ETS50N-30-1003		1/2" MNPT	30mm	Output 1: switch PNP, N.O./N.C., selectable Output 2: switch PNP, N.O./N.C., selectable
ETS50N-50-1003			50mm	
ETS50N-100-1003			100mm	
ETS50N-150-1003			150mm	
ETS25N-30-1003		1/4" MNPT	30mm	
ETS25N-50-1003			50mm	

** Only one output can be configured as analog.*

c UL us

CE

Operating Instructions

1 Document Information 3
1.2 Notes on Safety Conventions and Icons 3

2 Basic Safety Instructions 3
2.1 Designated Use 3
2.2 Installation, Commissioning and Operation 3
2.3 Operational Safety 3
2.4 Certificates and Approvals 4

3 Installation 4
3.1 Installation Conditions 4
3.2 Mounting the Device 4

4 Electrical Connection 5

5 Operating Options 5
5.1 On-Site Operation 5
5.2 Navigating in the Operating Menu 6
5.3 Structure of the Operating Menu for 2x Switch Outputs 7
5.4 Structure of the Operating Menu for 1x Switch Output and 1x Analog Output (4 to 20mA) . 8
5.5 Basic Settings 9
5.6 Settings for Output - 2x Switch Output 9
5.7 Settings for Output - 1x switch output and 1x analog output (4 to 20mA) 11
5.8 Settings for Service Functions 13
5.9 Programming with XT-SOFT Software 14
5.10 Additional Operating Options 14

6 Diagnostics and Troubleshooting 14
6.1 Diagnostic Information on Local Display 14

7 Maintenance 16

8 Technical Data 16

1 Document Information

1.2 Notes on Safety Conventions and Icons

Always refer to the safety instructions in these Operating Instructions labeled with the following symbols:

Symbol	Meaning
⚠ WARNING	WARNING! This symbol alerts you to a dangerous situation. Failure to avoid this situation can result in serious or fatal injury.
⚠ CAUTION	CAUTION! This symbol alerts you to a dangerous situation. Failure to avoid this situation can result in a minor or medium injury.
NOTICE	NOTICE This symbol contains information on procedures and other facts which do not result in personal injury.
ℹ	This symbol indicates additional information or tip

2 Basic Safety Instructions

2.1 Designated Use

The ProSense ETS Series digital temperature sensor is for monitoring, displaying and regulating process temperatures. The device has been safely built with state-of-the-art technology and meets the applicable requirements and European Community (EC) Directives. It can, however, be a source of danger if used incorrectly or for anything other than the designated use.

2.2 Installation, Commissioning and Operation

Installation, electrical connection, commissioning, operation and maintenance of the measuring system must be carried out by trained, qualified specialists authorized to perform such work by the facility's owner-operator. The specialist must have read and understood these Operating Instructions and must follow them. The device may only be modified and repair work carried out if this is explicitly permitted in the Operating Instructions. Damaged devices which could be a source of danger may not be commissioned and must be labelled and identified as defective.

2.3 Operational Safety

The measuring device meets the general safety requirements according to EN 61010-1 and the EMC requirements according to IEC/EN 61326 in addition to the NAMUR recommendations NE 21, NE 43 and NE 53.

- Functional safety
  The ProSense ETS Series digital temperature sensors are were developed according to the standards IEC 61508 and IEC 61511-1 (FDIS). The device version with PNP switch output and additional analog output is equipped with fault detection and fault prevention facilities within the electronics and software.

- Hazardous Locations

  The ProSense ETS Series is **not** approved for use in Hazardous Locations.

2.4 Certificates and Approvals

CE mark, declaration of conformity

The device is designed to meet state-of-the-art safety requirements and left the factory in a condition in which it is safe to operate. The device complies with the standards EN 61010-1 "Protection Measures for Electrical Equipment for Measurement, Control, Regulation and Laboratory Procedures" and with the EMC requirements of IEC/EN 61326. The device meets the legal requirements of the EU Directives. The manufacturer confirms a positive completion of all tests by fitting the unit with a CE mark.

UL Approval

UL Listed

3 Installation

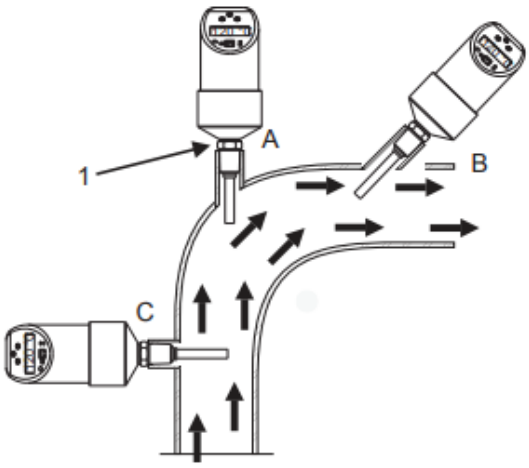
3.1 Installation Conditions

NOTICE

Do not thread sensor into process connection by turning the housing. Always use a wrench on the wrench flats to tighten the sensor into the process connection.

3.2 Mounting the Device

Possible installation options for temperature monitoring in pipes:

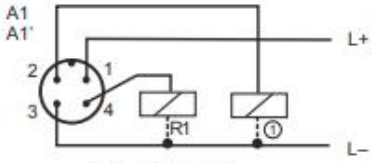


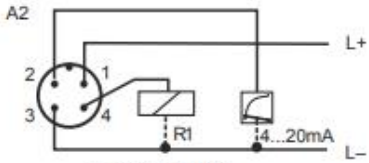
1 Hexagonal screw on sensor module

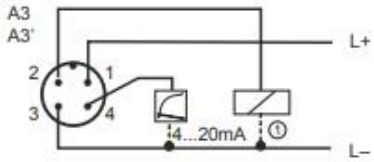
General mounting instructions:

- Installation at angle pieces, against the direction of flow (item A).
- Installation in smaller pipes, inclined against the direction of flow (item B).
- Installation vertical to the direction of flow (item C).
- The on-site display can be rotated electronically 180°.
- The housing can be rotated up to 310°.

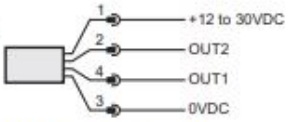
4 Electrical Connection







Cable Assembly Wiring Colors:
Pin 1 - Brown
Pin 2 - White
Pin 3 - Blue
Pin 4 - Black
Note: Wiring colors are based on AutomationDirect CD12L and CD12M 4-pole cable assemblies.
Wiring diagram is based on user selected configuration.



A1: 2x PNP switch outputs R1 and ① (R2)
A1': 2x PNP switch outputs R1 and ① (diagnosis/NC contact with "DESINA" setting)
A2: 1x PNP switch output and 1x analog output (4 to 20 mA)
A3: 1x analog output (4 to 20 mA) and 1x PNP switch output ① (R2)
A3': 1x analog output (4 to 20 mA) and 1x PNP switch output ① (diagnosis / NC contact with "DESINA" setting)

NOTICE

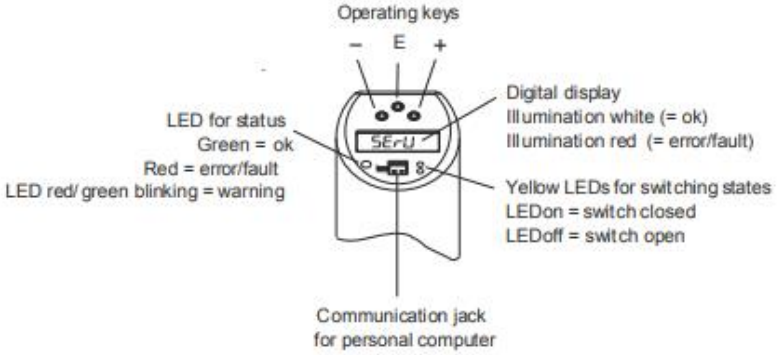
To avoid the analog input damaging of a PLC, do not connect the active PNP switch output of the device to the 4...20 mA input of a PLC.

For more information about DESINA, see www.desina.de
(See also Basic Settings section in this manual.)

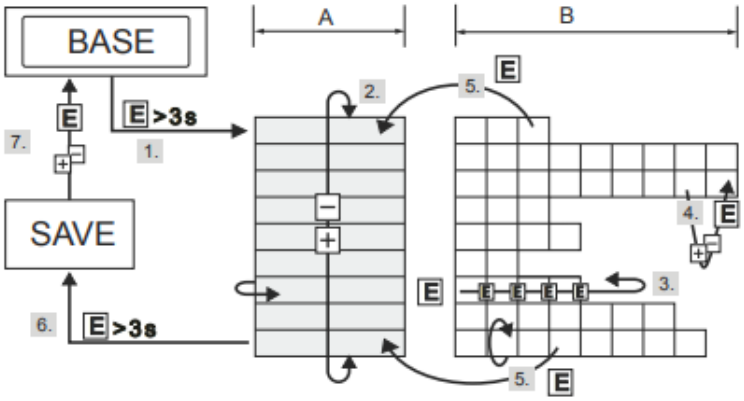
5 Operating Options

5.1 On-Site Operation

The ProSense ETS Series is programmed and operated by means of three keys or by using XT-SOFT programming software (see the Programming with XT-SOFT Software section of these instructions). The digital display and the light emitting diodes (LEDs) support navigation in the operating menu.



5.2 Navigating in the Operating Menu

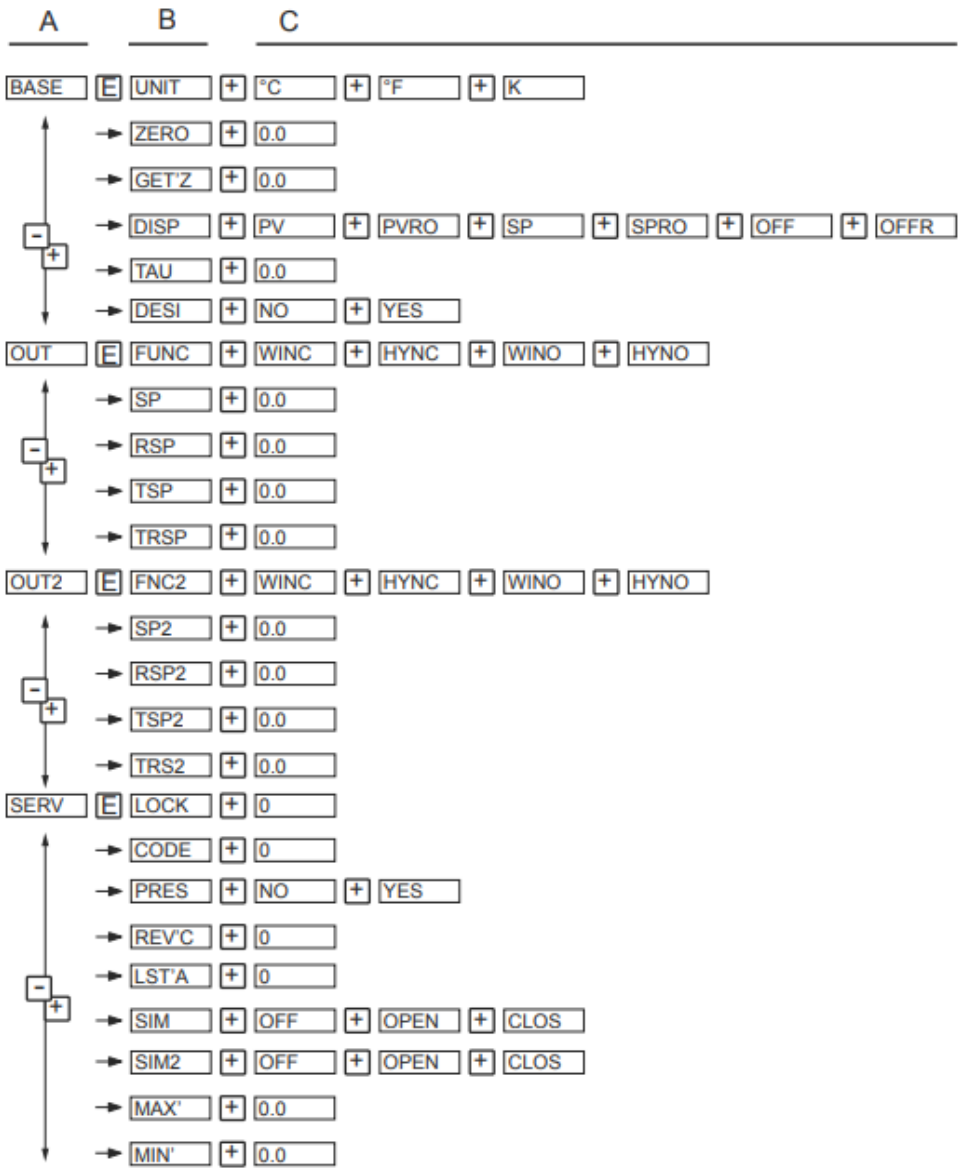


A Function group selection
B Function selection

1. Enter the operating menu.
   Press the E key for longer than 3 seconds.
2. Select the "Function group" with the + or - key.
3. Select the "Function" with the E key.
4. Enter or change parameters with the + or - key.
   Then return to "Function" with the E key.
   Note: If software locking is enabled, it must be disabled before making entries or changes.
5. Press the E key several times to return to the "Function group" - until the appropriate function group is reached again.
6. To exit, press the E key for longer than 3 seconds. If changes were made, see step 7.
7. Query to save data (select "YES" or "NO" with the + or - key) - confirm with the E key.

Changes to the parameter settings only become effective if you choose 'YES' when asked to save data.

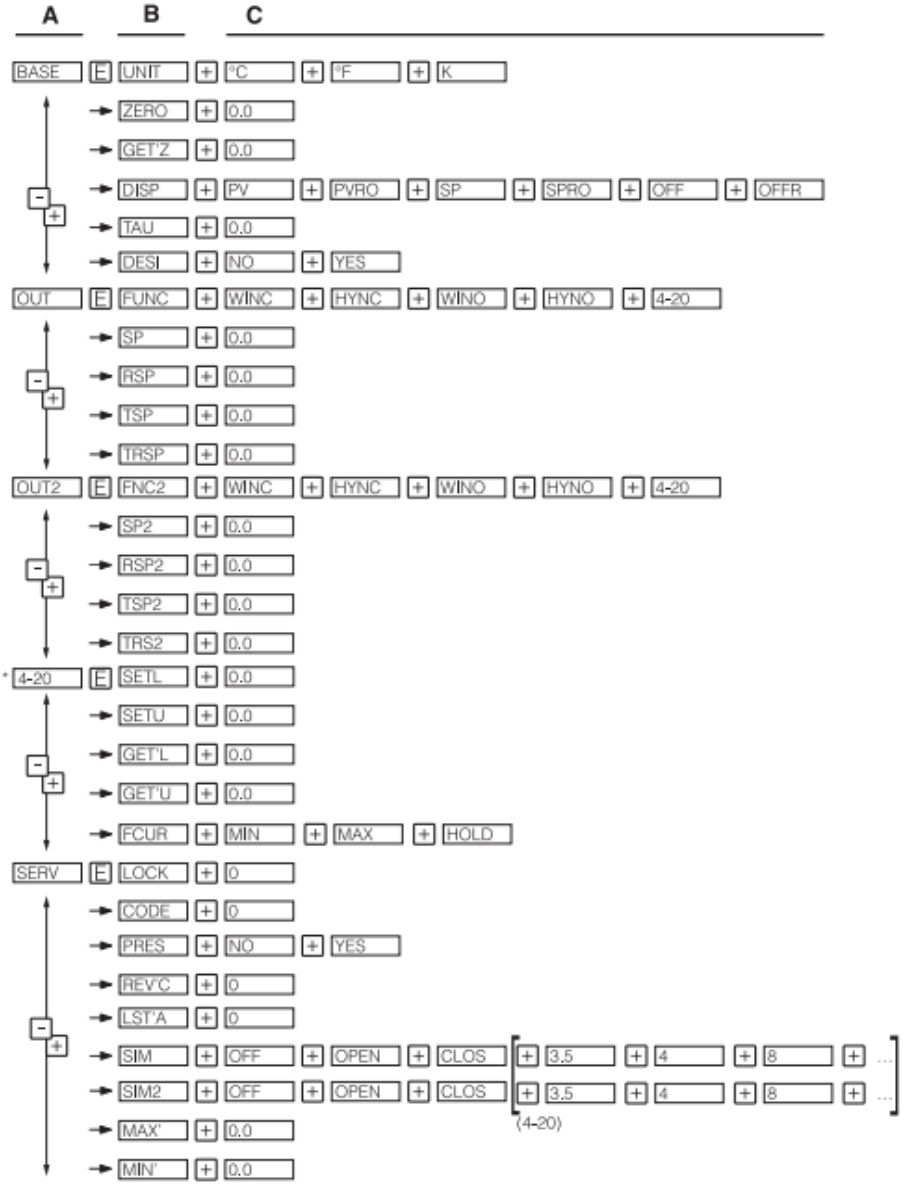
5.3 Structure of the Operating Menu for 2x Switch Outputs



Operating menu: A=function groups, B=functions, C=settings

5.4 Structure of the Operating Menu for 1x Switch Output and 1x Analog Output (4 to 20mA)

Devices with analog output either output 1 or output 2 can be configured as an analog output. It is possible to configure both output 1 and output 2 as a switch output.



Operating menu: A=function groups, B=functions, C=settings

*The function group 4-20 is available only if the 4 to 20mA analog output (4-20) is selected in the function group OUT or OUT2 under FUNC or FNC2.

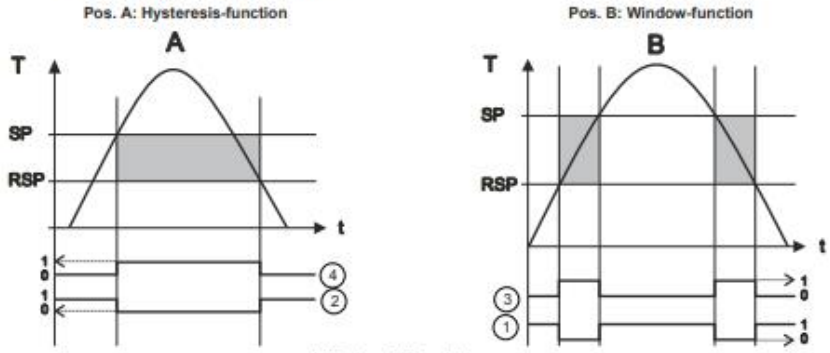
5.5 Basic Settings

Function Group	Function		Settings	Description
BASE	UNIT	Technical unit	°C °F K	Select technical unit: °C, °F, K Factory setting: °F
	ZERO	Configure zero point	0.0	Position adjustment: within ±18°F/K (±10°C) of the upper range limit
	GET'Z	Accept zero point	0.0	No settings possible (not available in XT-SOFT)
	DISP	Display	PV PVRO SP SPRO OFF OFFR	PV: measured value display PVRO: measured value display rotated 180° SP: set switch point display SPRO: set switch point display rotated 180° OFF: display off OFFR: display off rotated 180° Factory setting: measured value PV
	TAU	Damping: display value, output signal	0.0	Measured value damping with regard to display value and output: 0 (no damping) or 9 to 40s (in increments of 1 second) Factory setting: 0s
BASE	DESI	DESINA	NO YES	PIN assignment of the M12 connector is in accordance with the guidelines of DESINA Factory setting: No

5.6 Settings for Output - 2x Switch Output

- Hysteresis function
  The hysteresis function enables two-point control via a hysteresis. Depending on the temperature (T), the hysteresis can be set via the switch point (SP) and the switch-back point (RSP).
- Window function
  The window function enables the monitoring of a process temperature range.
- NO contact or NC contact
  This switch function is freely selectable.
- Delay times for switch point (SP) and switch-back point (RSP) can be set in increments of 1 second to filter out undesirable temperature peaks of short duration or high frequency.

- Factory setting: Switch point SP 1: 113.0°F (45°C); Switch-back point RSP 1: 112.1°F (44.5°C) Switch point SP 2: 131.0°F (55°C); Switch-back point RSP 2: 130.1°F (54.5°C)
- Range of adjustment
  LRL = Lower Range Limit
  URL = Upper Range Limit
  LRV = Lower Range Value
  URV = Upper Range Value



1 Window - NC contact
2 Hysteresis - NC contact
3 Window - NO contact
4 Hysteresis - NO contact
SP switch point; RSP switch-back point

Function Group	Function		Settings	Description
OUT Output 1 OUT 2 Output 2	FUNC FNC2	Switching characteristic	WINC HYNC WINO HYNO	WINC: window/NC contact HYNC: hysteresis/NC contact WINO: window/NO contact HYNO: hysteresis/NO contact Factory setting: HYNO
	SP SP2	Switch point value	0.0	Switch point: -57.1 to 302°F (-49.5 to 150°C) in increments of 0.18°F (0.1°C)
	RSP RSP2	Switch-back point value	0.0	Switch-back point: -58 to 300°F (-50 to 149°C) in increments of 0.18°F (0.1°C)
	TSP TSP2	Switch point delay	0.0	Delay time: 0...99s in increments of 0.1s Factory setting: 0s
	TRSP TRS2	Switch-back point delay	0.0	Delay time: 0...99s in increments of 0.1s Factory setting: 0s
Min. distance between SP and RSP: 0.9°F/K (0.5°C)				

5.7 Settings for Output - 1x switch output and 1x analog output (4 to 20mA)

Function Group	Function		Settings	Description
OUT Output 1 OUT 2 Output 2	FUNC FNC2	Switching characteristic	WINC HYNC WINO HYNO 4-20	WINC: window/NC contact HYNC: hysteresis/NC contact WINO: window/NO contact HYNO: hysteresis/NO contact 4-20: analog output Factory setting: HYNO
	SP SP2	Switch point value	0.0	Switch point -57.1 to 302°F (-49.5 to 150°C) in increments of 0.18°F (0.1°C)
	RSP RSP2	Switch-back point value	0.0	Switch-back point -58 to 300°F (-50 to 149°C) in increments of 0.18°F (0.1°C)
	TSP TSP2	Switch point delay	0.0	Delay time 0...99s in increments of 0.1s Factory setting: 0s
	TRSP TRS2	Switch-back point delay	0.0	Delay time 0...99s in increments of 0.1s Factory setting: 0s
Min. distance between SP and RSP: 0.9°F/K (0.5 °C)				

Function Group	Function		Settings	Description
4-20 Analog output	SETL	Value for 4mA (LRV)	0.0	-58 to 266°F (-50 to 130°C) Lower range value in increments of 0.18°F (0.1°C) Factory setting: 32.0°F (0.0°C)
	SETU	Value for 20mA (URV)	0.0	-22 to 302°F (-30 to 150°C) Upper range value in increments of 0.18°F (0.1°C) Factory setting: 302°F (150°C)
	GETL	Temperature applied for 4mA (LRV)	0.0	Take temperature value as lower range value (not via XT-SOFT)
	GETU	Temperature applied for 20mA (URV)	0.0	Take temperature value as upper range value (not via XT-SOFT)
	FCUR	Error current	min MAX HOLD	Current value in event of error: MIN = ≤ 3.6 mA MAX = ≥ 21.0 mA HOLD = last value Factory setting: MAX
Min. distance between SETL and SETU: 36°F/K (20°C)				

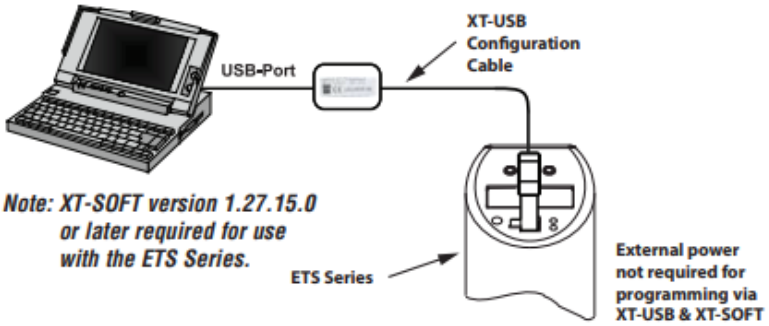
The function group 4-20 is available only if the 4 to 20mA analog output (4-20) is selected in the function group OUT or OUT2 under FUNC or FNC2.

5.8 Settings for Service Functions

Function Group	Function		Settings	Description
SERV Service functions	LOCK	Locking code	0	Enter the locking code for enabling the device.
	CODE	Change locking code	0	Freely selectable code 1...9999. 0 = no locking A locking code already assigned can only be changed by first entering the old code for enabling the device.
	PRES	Reset	NO YES	Resets all entries to the factory setting (not via XT-SOFT)
	REV'C	Revision counter	0	Increases by 1 with each configuration
	LST'A	Last device status	0	Displays the last device status to occur ≠ 0
	SIM SIM2	Simulation output 1 or 2	OFF OPEN CLOS 3.5 (if analog output available)	OFF: No simulation OPEN: Switch output open CLOS: Switch output closed 3.5: Simulation values for analog output in mA (3.5 / 4.0 / 8.0 / 12.0 / 16.0 / 20.0 / 21.7)
	MAX'	Max. indicator	0.0	Display of max. measured process value
	MIN'	Min. indicator	0.0	Display of min. measured process value

5.9 Programming with XT-SOFT Software

The ETS Series can be programmed using XT-SOFT programming software, available as a free download at www.automationdirect.com, and an XT-USB configuration cable (purchased separately). The operating options listed in the previous "On-Site Operation" section are available via XT-SOFT except as noted.



External power not required for programming via XT-USB & XT-SOFT

Note: XT-SOFT version 1.27.15.0 or later required for use with the ETS Series.

5.10 Additional Operating Options

In addition to the operating options listed in the previous "On-Site Operation" section, the XT-SOFT software provides the following read-only information.

Function Group	Description
Service Setting	Number of switch changes for output 1
	Number of switch changes for output 2
	Device status
Identification	Tag number
	Order code
	Limit switch serial number
	Sensor serial number
	Electronics serial number
	Device release (change status)
	Hardware version
	Software version

6 Diagnostics and Troubleshooting

6.1 Diagnostic Information on Local Display

If an error in the device occurs, the color of the status LED changes from green to red and the digital display illumination changes from white to red. A status LED flashing red and green signals a warning. The display shows:

- E-code for errors
  In the event of an error message, the measured value is uncertain.
- W-code for warnings
  In the event of a warning, the measured value is reliable.

Code	Explanation	Remedy
E011	Device configuration faulty	Reset device (See Settings for Service Functions).
E012	Error in measurement or medium temperature outside specification	Check medium temperature. Contact AutomationDirect's Returns Department for warranty status.
E019	Power supply outside specification	Check operating voltage
E015	Memory error	Contact AutomationDirect's Returns Department for warranty status.
E020		
E021		
E022	Power is only supplied to the device via the communication interface (measurement is deactivated)	Check operating voltage
E025	Switching contact 1 is not open although it should be	Switching contact defective. Contact AutomationDirect's Returns Department for warranty status.
E026	Switching contact 2 is not open although it should be	Switching contact defective. Contact AutomationDirect's Returns Department for warranty status.
E040	VCC (Controller voltage) is out of working area	Contact AutomationDirect's Returns Department for warranty status.
E042	Output current can no longer be generated (only for 4 to 20 mA output, e.g. load at analog output too high or open analog output).	Check load. Switch off analog output via configuration, if it isn't required, see Settings for Output section.
E044	Output current drifts too much (± 0.5 mA)	Contact AutomationDirect's Returns Department for warranty status.
W107	Simulation active	Switch off the output simulation for output 1 and output 2
W202	Measured value outside of the sensor range	Operate the device in the specified temperature range
W209	Device starts	
W210	Configuration modified (warning code will be displayed for approximately 15 seconds)	
W212	Sensor signal outside the permitted range	Operate the device in the specified temperature range
W250	Number of switch cycles exceeded	Contact AutomationDirect's Returns Department for warranty status.
W270	Short-circuit or overload at output 1	Check output wiring. Increase the load resistance at output 1
W280	Short-circuit or overload at output 2	Check output wiring. Increase the load resistance at output 2

7 Maintenance

Any buildup on the sensor can have a negative effect on the sensor response time. For this reason, check the sensor for buildup at regular intervals.

⚠ CAUTION

Removing the device

Make sure the process is unpressurized before you remove the device! Do not twist the device out of the process connection thread at the housing. Always use a suitable open-ended wrench on the wrench flats for disassembly work.

8 Technical Data

For further technical data and scale drawing visit: www.automationdirect.com.

8..5. Creación de un formato de mantenimiento

Para dar un correcto mantenimiento a la maquina objeto de estudio, de forma ordenada y con una estructura bien definida es necesaria crear un formato de orden de mantenimiento, el cual se presenta a continuación:

ORDEN DE LABOR DE MANTENIMIENTO

#OLM:

Fecha emitida: / /

Emitido por:

Tipo de mantenimiento:

[ ] Mantenimiento correctivo [ ] Mantenimiento periódico [ ] Mantenimiento Predictivo

Objeto de mantenimiento:

[ ] Sistema de control [ ] Sistema de bombeo/flujo [ ] Sistema de medición

[ ] Intercambiador de calor

Trabajo por realizar:

Equipo:

Código: - -

Horario y duración del mantenimiento:

Fecha de inicio: / /

Fecha de termino: / /

Personal encargado:

Nombre completo del encargado	DNI	Cargo/Especialidad	Observaciones

Materiales necesarios:

Ítem	Cantidad	Descripción	P/N	Observaciones

Se acepta el trabajo realizado: Si No

Si es NO, Por qué:_____

Imagen 32: Formato de orden de mantenimiento (Fuente: Elaboración propia)

8..6. Gestión de recursos humanos

Toda labor de mantenimiento debe estar a cargo de personal calificado y, además, dicha labor no debe entorpecer las labores de otras áreas, y si lo hiciese se debe gestionar al capital humano para evitar sobresaltos y problemas en la cadena de producción, esta es una de las principales ventajas del mantenimiento preventivo.

Para ello se procederá primero con un recuento del personal a cargo de la planta de prueba y de sus roles como operarios:

Equipo encargado						
N°	Nombres y apellidos completos	DNI	Cargo	Función	Personal principal o de respaldo	Contacto (Email o celular)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Tabla 7: Plantilla registro de recursos humanos (Fuente: Autoría propia)

De igual forma es importante profundizar en las tareas específicas de cada persona, así como especificar lo que se espera que logren en su trabajo, para ello tenemos el siguiente formato ejemplo:

Jefe de laboratorio

I. IDENTIFICACIÓN

Cargo : Jefe de laboratorio

Reporta a : Ingeniero jefe del área

Área : Energía

II. DEFINICIÓN DEL PUESTO

- Operar la planta con fines educativos.
- Velar por la seguridad de todos los alumnos que asistan a el laboratorio y/o manipulan la planta en funcionamiento.
- Reportar cualquier incidente respecto al funcionamiento de toda o una sola parte de la planta.

III. FUNCIONES Y RESPONSABILIDADES

- Diarias
  - Revisar el buen estado de los materiales e ítems de la planta.
  - Garantizar la integridad de la salud de los alumnos que ingresen al laboratorio.
  - Resolver consultas de los alumnos.
- Periódicas
  - Facilitar la información requerido al equipo de mantenimiento.
  - En caso de que sea requerido, participar en las tareas de mantenimiento.
- Eventuales
  - Realizar un parado de emergencia de la planta, por causa de alguna eventualidad.
  - Auxiliar frente a cualquier accidente acontecido dentro del laboratorio.

Imagen 33: Formato de roles y responsabilidades de personal (Fuente: Autoría propia)

8..7. Planificación y programación de los mantenimiento

Para la programación de los diversos mantenimientos se usarán los resultados observado en el capítulo 8.2, donde finalmente nos quedaría:

PLANIFICACION ANUAL DEL MANTENIMIENTO

Actividad	Duracion (min)	Ene-25				Feb-25				Mar-25				Abr-25				May-25				Jun-25				Jul-25				Ago-25				Set-25				Oct-25				Nov-25				Dic-25			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Mantenimiento del intercambiador	180										A																																						
Mantenimiento del motor	90										A																																						
Inspeccion del motor	60				M				M								M				M				M				M				M				M				M				M				M
Limpieza del sistema de bombeo	200									A																																							
Inspeccion del sistema de control	40				M				M								M				M				M				M				M				M				M				M				M
Inspeccion del sistema de medicion	40		M				M								M				M				M				M				M				M				M				M				M		
Inspeccion del calentador (Resistencia de 1200W)	20		M				M								M				M				M				M				M				M				M				M				M		
Limpieza del ambiente	30	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D

Imagen 34:Planificacion anual de mantenimiento (Fuente: Autoría propia)

8..8. Flujograma y Organigrama

Tal y como se explicó antes, para que el mantenimiento preventivo que se ha venido relatando en el presente documento, es necesario tener una idea clara de cómo se llevara a cabo dicho mantenimiento, asimismo, es muy importante también para cualquier industria/empresa/laboratorio, contar con una estructura clara de las personas que lo conforman, es por todo esto que se realizó la siguiente plantilla para el mantenimiento preventivo para la planta donde se encuentra nuestro objeto de estudio, el intercambiador de calor:

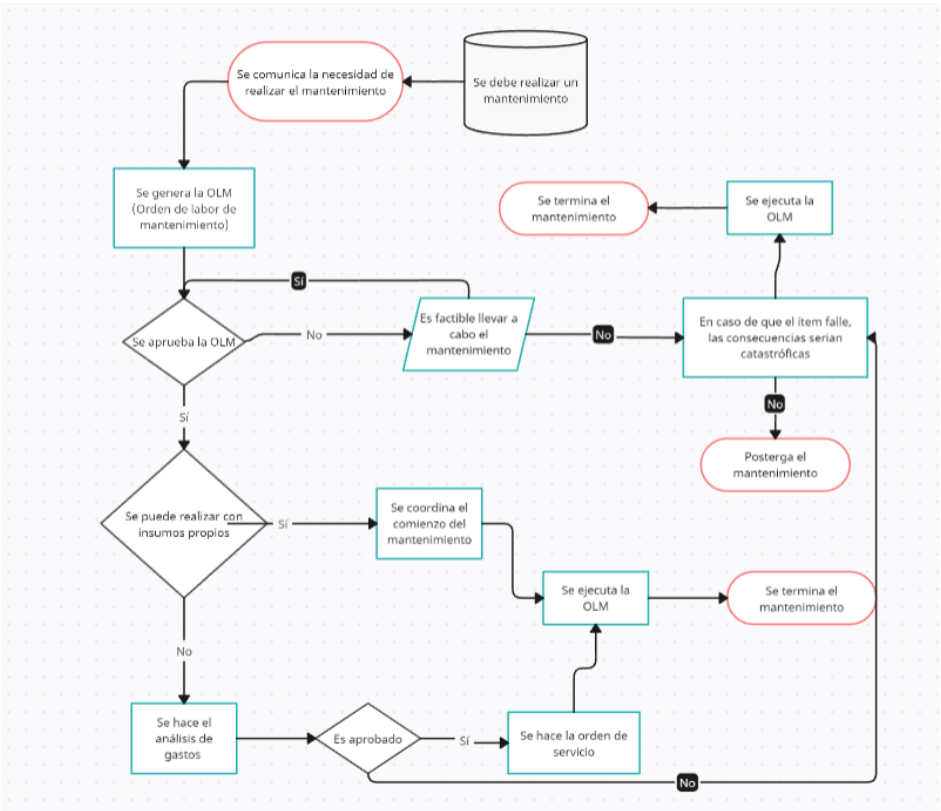


Imagen 35: Flujograma del proceso de mantenimiento (Fuente: Autoría propia)

Con respecto al organigrama, se hace mención importante de que se conoce de la estructura jerárquica de la Universidad de Piura, pero que, dado el tema del presente trabajo, dicha estructura se simplificara y se centrara en la facultad de ingeniería de la Universidad de Piura:

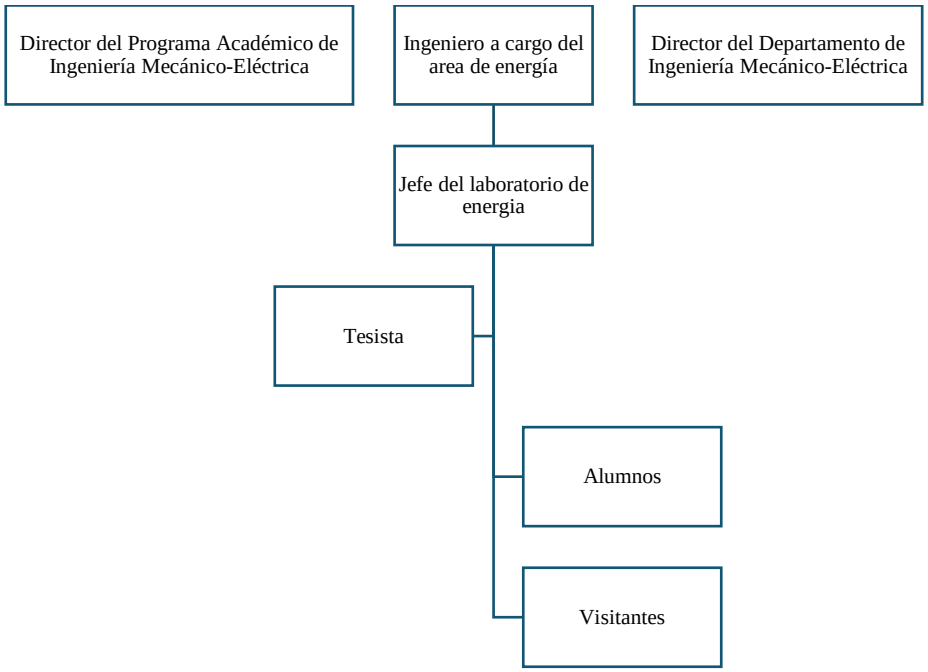


Imagen 36: Organigrama centrado en el manejo de la planta (Fuente: Autoría propia)

8..9. Gestión de desechos tóxicos

Dado que los fluidos con los que trabajara la planta son únicamente: agua y aceite en el caso de un uso industrial o solo agua en el caso de un uso educativo, los residuos tóxicos como tal son mínimos y no representan un gran riesgo para el medioambiente.

Según el Decreto Legislativo N° 1278 y el DECRETO SUPREMO Nº 001-2022-MINAM, los cuales ambos regulan la cantidad mínima de desechos tóxicos y la forma en las que son desechadas, en dicha normativa, no se cataloga el aceite quemado como un residuo toxico, y en caso así fuera, se especifica que el desecho debe darse de manera mensual hacia centros especializados en el tratamiento de los desechos en cuestión.

En nuestro caso en específico, la empresa prestadora de residuos sólidos más cercana es TRANSPORTES Y SERVICIOS GENERALES LARA EIRL, ubicada en el distrito de Catacaos, provincia de Piura, Departamento de Piura.

8..10. Gestión de la SST (Seguridad y salud en el trabajo)

Con respecto a los riesgos por parte del personal que se encargará de operar la planta donde se encontrará la máquina de estudio tenemos:

- Quemaduras por fluido caliente
- Descarga eléctrica por falta de aislamiento
- Aplastamiento de zonas blandas

Para lidiar con ello, se hará uso de la norma ISO 4500, la cual define a un peligro como una fuente, situación o acto con potencial para causar daño humano, deterioro de la salud, daños físicos o una combinación de estos.

Asimismo, se recomendará que exista un botiquín de primeros auxilios en un radio menor al 4m con respecto a la ubicación de la planta.

9. Conclusiones

- ✓ El mantenimiento preventivo, implementado mediante el uso de gemelos digitales, resulta fundamental para mejorar la eficiencia operativa y prolongar la vida útil de los equipos. La simulación y el modelado permiten anticipar y prevenir fallos potenciales, minimizando tiempos de inactividad y costos asociados.

- ✓ La implementación de gemelos digitales mediante herramientas de modelado 3D como SolidWorks, y el análisis con MATLAB y ANSYS, demuestra ser una solución prometedora para la supervisión y optimización del rendimiento de los intercambiadores de calor. La equivalencia en funcionamiento entre los modelos virtuales y reales valida la efectividad de esta tecnología, aunque es importante destacar que esto variara dependiendo de la calidad del mallado del modelo 3D simulado.

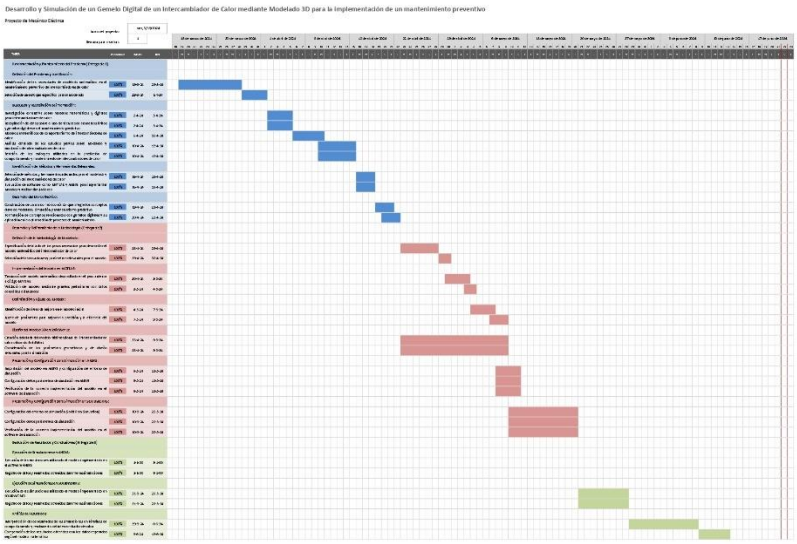
- ✓ La falta de datos históricos en un dispositivo puede mermar la eficacia del gemelo digital, al no poder estimar con exactitud la evolución en el tiempo que este tendrá. Se evidenció como se complica un poco más la estimación de parámetros y su evolución temporal, en este caso en particular, los parámetros más propensos a verse modificados y que influyen en gran medida en el funcionamiento del intercambiador son los factores de ensuciamiento, que si bien, existen valores referenciales para estos, no existen métodos precisos para estimar su comportamiento, debido a las condiciones particulares en las que trabaja cada intercambiador.

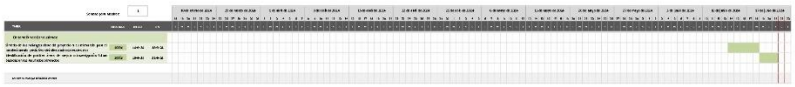
- ✓ Es importante considerar la necesidad de un monitoreo continuo y detallado del rendimiento del gemelo digital implementado. Dado que la efectividad del mantenimiento preventivo depende en gran medida de la precisión y la calidad de los datos recopilados, se recomienda establecer un sistema de retroalimentación

que permita ajustar y optimizar el modelo en tiempo real. Esto no solo mejorará la precisión de las predicciones, sino que también facilitará la identificación temprana de posibles fallos, asegurando así una mayor eficiencia y prolongación de la vida útil del intercambiador de calor.

- ✓ La digitalización de procesos y la monitorización continua de parámetros operativos son cruciales en la Industria 4.0. La implementación de gemelos digitales permite un control cercano e inmediato, adaptándose a los cambios dinámicos de los procesos industriales, especialmente en la industria térmica.

10. Cronograma





Bibliografía

Alvarez, G., Kröhling, D., & Martinez, E. (2024). *Bases para el desarrollo y aplicación de Gemelos Digitales en la industria de la energía eléctrica.* Buenos Aires: Ingenio Tecnologico.

Barros Costa, A., & Balduino, A. (2018). The importance of preventive and corrective maintenance in works. *IEEEXPLORE*.

Caputo, A. C., Pelagagge, P. M., & Salini, P. (2011). Joint economic optimization of heat exchanger design and maintenance policy. *Scopus*, 1381-1392.

Cengel, Y. (2011). *Transferencia de calor y masa*.

Hianshu, S., Utkarsh, M., Prateek, S., & Ganesh, S. (2020). Digital Twin for Shell and Tube Heat Exchanger in Industry 4.0. En S. Hianshu, M. Utkarsh, S. Prateek, & S. Ganesh, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*.

Ng, X. W. (2021). Concise Guide to Heat Exchanger Network Design. En X. W. Ng, *Concise Guide to Heat Exchanger Network Design* (pág. 148). Switzerland: Springer Cham.

Ramírez Zapata, M. M. (2023). *Análisis de un módulo de intercambiador de calor de tubo y coraza para laboratorio utilizando métodos numéricos.* Piura: Pirhua.

Silva Burga, J. E. (2005). *Implantacion del TPM en la zona de enderezadoras de Aceros Arequipa.* Piura: pirhua.

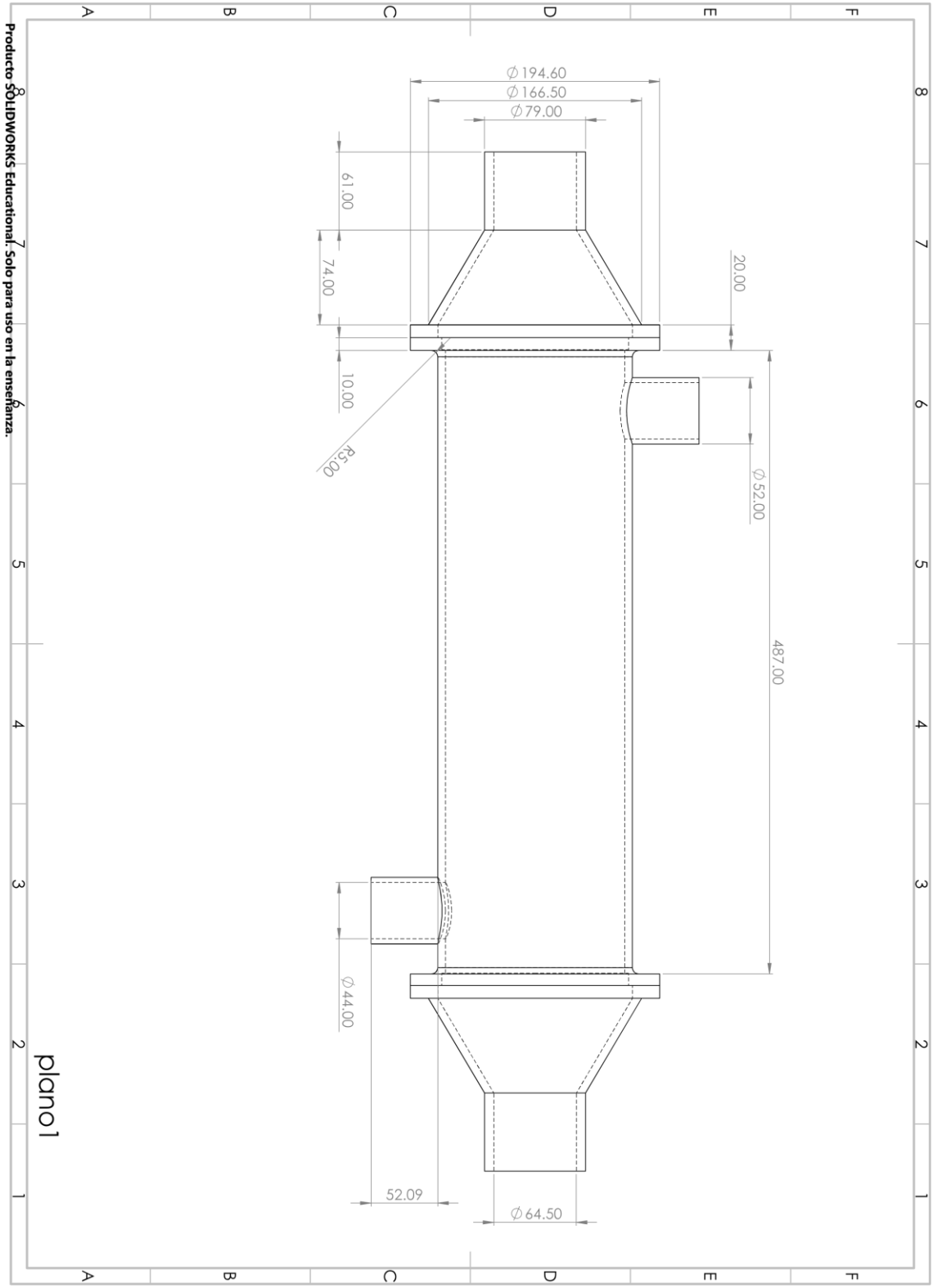
Su, H., & Cao, Q. (2024). Condition-based opportunistic maintenance strategy for multi-component wind turbines by using stochastic differential equations. *Nature*.

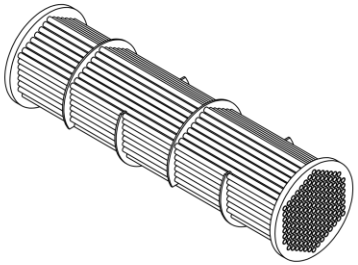
Tavares, L. A. (2003). *Administracion moderna de mantenimiento.* Rio de janerio: Novo Polo.

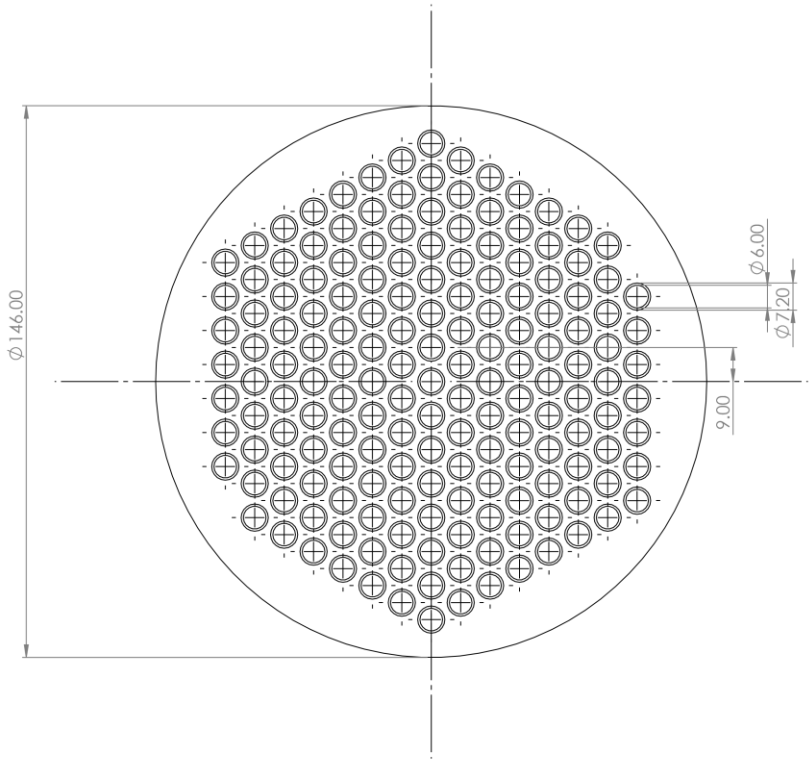
Toral Franco, X. d., & Burgos Toaza, L. E. (2013). *Diseño e implementacion de un programa de mantenimiento productivo total (TPM) en una empresa productora de alimentos balanceados.* Guayaquil.

Yaksetig Castillo, J. (2015). *Mantenimiento Preventivo.* Piura.

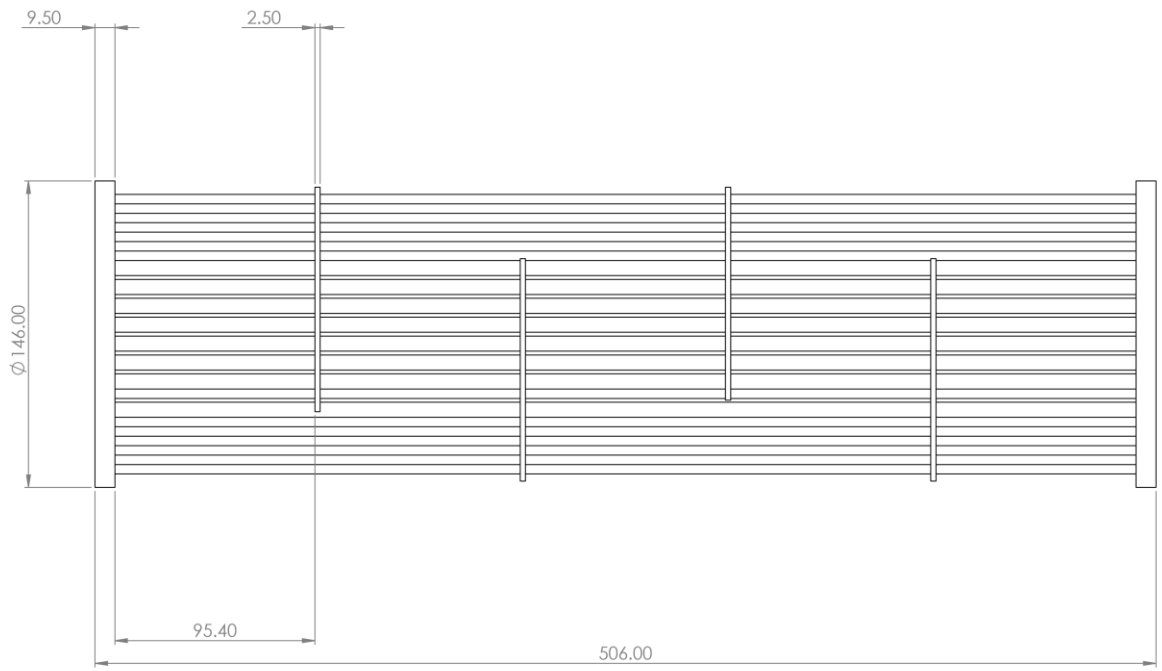
Anexos


Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.
∅194.60
∅166.50
∅79.00
61.00
74.00
10.00
R5.00
20.00
∅52.00
487.00
∅44.00
52.09
∅64.50
plano1

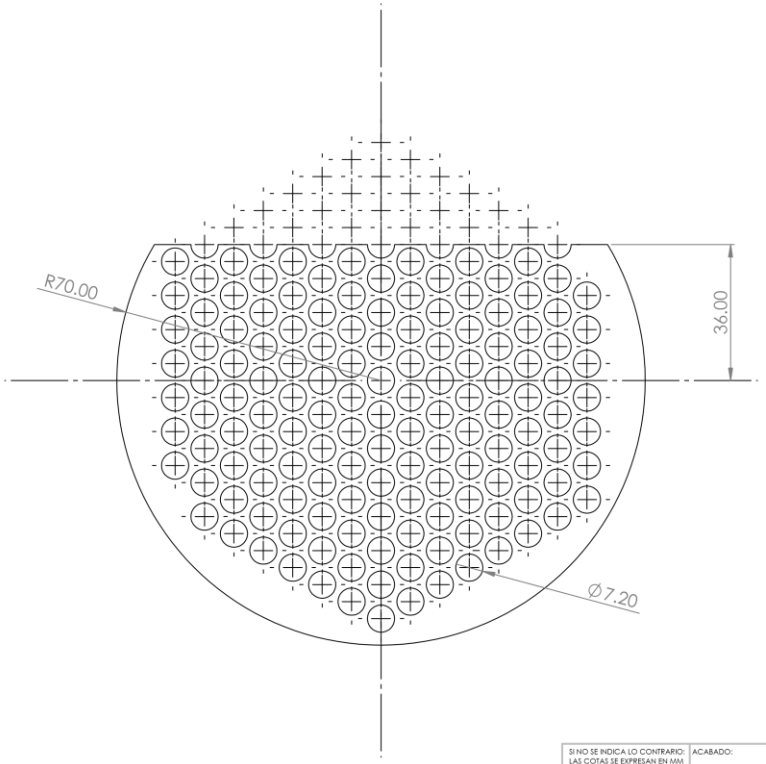




SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:	ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.			MATERIAL:	N.º DE DIBUJO plano2	A3
			PESO:	ESCALA:1:5	HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:	ACABADO:			REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
	NOMBRE	FIRMA	FECHA		TÍTULO:	
DIBUJ.						
VERIF.						
APROB.						
FABR.						
CALID.				MATERIAL:	N.º DE DIBUJO plano3	A3
				PESO:	ESCALA:1:5	HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:	ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.				MATERIAL:	N.º DE DIBUJO plano4 A3
				PESO:	ESCALA:1:5 HOJA 1 DE 1