UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL
SEDE CENTRAL
INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN INDUSTRIAL

Análisis de un sistema de enfriamiento líquido para articulaciones robóticas mediante un estudio dinámico de fluido computarizado en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional, durante el periodo 2020-2022

Tesis para optar por el grado académico de
Licenciatura en Ingeniería en Producción Industrial

Tutor: Máster Mauricio Rodríguez Calvo
Lector: Ing. Alexis Morales Quesada

Sustentantes:
María Fernanda Madriz Ramírez
Kevin Alberto Solano Núñez

Costa Rica, 2022

HOJA DE APROBACIÓN

Este Trabajo Final de Graduación fue aprobado por el Tribunal Evaluador como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Producción Industrial.

_____

[Grado académico y nombre completo]
Director de carrera

_____

M.Sc. Mauricio Rodríguez Calvo
Tutor

_____

Ing. Alexis Morales Quesada
Lector

_____

[Grado académico y nombre completo]
Representante del sector empresarial

DEDICATORIAS

Primeramente, a Dios, por haberme dado salud y sabiduría. Le dedico este proyecto a mis pilares fundamentales, los cuales con su gran amor me han guiado por el camino del bien, sin cortarme las alas, mis padres, Laura Ramírez y Gustavo Madriz.

María Fernanda Madriz Ramírez

Esta tesis va dedicada a todas las personas que me apoyaron en este proceso de formación académica, a mi madre, Shirley Núñez Abarca, por su apoyo incondicional en estos años y gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía. Además, a mis familiares que formaron y forman parte de cada meta lograda en mi vida.

Finalmente, quiero dedicar esta tesis a todas mis amigas y amigos, por apoyarme cuando más los necesito, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, de verdad, mil gracias, siempre los llevo en mi corazón.

Kevin Alberto Solano Núñez

AGRADECIMIENTOS

Muchos dicen que la mejor herencia que se le puede dar a un hijo es el estudio, a Dios gracias me han heredado mucho más que eso, valores como la perseverancia, el amor incondicional y la resiliencia, infinitas gracias a mis padres por apoyarme en todo.

Gracias a la Universidad Técnica Nacional, por abrirme las puertas, me enseñó que con amor y disciplina puedo alcanzar mis objetivos.

También, quiero agradecer a todos los que estuvieron presentes, en especial al tutor, lector, director de carrera y mi compañero de tesis.

María Fernanda Madriz Ramírez

Agradezco principalmente a Dios, luego a mi madre, quien, con su apoyo en los momentos cruciales de mi carrera, me alentó a continuar, brindándome paciencia y sabiduría para culminar con éxito mis metas propuestas.

Al M.Sc. Mauricio Rodríguez Calvo, quien compartió sus conocimientos, mediante el seguimiento, asesoramiento y guía en el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al Ing. Alexis Morales Quesada, quien fue uno de los que nos brindó su apoyo y asesoramiento en esta tesis.

Al Ing. Roberto Orozco Sánchez, director de la carrera de Ingeniería en Producción Industrial.

Finalmente, a la Universidad Técnica Nacional y a todos los docentes de mi carrera, por permitirme concluir con una etapa de mi vida.

Kevin Alberto Solano Núñez

TABLA DE CONTENIDO

HOJA DE APROBACIÓN ii

DEDICATORIAS iii

AGRADECIMIENTOS iv

TABLA DE CONTENIDO v

ÍNDICE DE TABLAS x

ÍNDICE DE FIGURAS xii

LISTA DE SIGLAS xiv

RESUMEN xvi

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN 1

1.1. Área de estudio y justificación 4

1.2.1. Área de estudio 4

1.2.2. Justificación 5

1.2. Estado de la cuestión 7

1.2.1. Estudios internacionales 7

1.2.2. Estudios nacionales 17

1.2.3. Conclusiones del apartado 18

1.3. Problematización 19

1.3.1. Pregunta problema 20

1.3.2. Limitaciones 21

1.3.3. Alcances 21

1.3.4. Temporalidad 21

1.4. Objetivos 22

1.4.1. Objetivo general 22

1.4.2. Objetivos específicos 22

1.6. Matriz de congruencia interna....23
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO....24
2.1. Marco conceptual....25
2.1.1. La termodinámica....25
2.1.2. Principios de la termodinámica....26
2.1.3. La energía aplicada a la industria....28
2.1.4. Energía en forma de calor....29
2.1.5. Mecanismos de transferencia de calor....29
2.1.6. Sistemas de enfriamiento....31
2.1.7. Intercambiadores de calor....33
2.1.8. La revolución de la robótica....34
2.1.9. La robótica y automatización industrial....35
2.1.10. Robots humanoides y articulaciones robóticas....37
2.1.11. La innovación industrial....40
2.1.12. Gestión de la innovación tecnológica....41
2.2. Marco contextual....41
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO....45
3.1. Enfoque....46
3.2. Tipo de estudio o profundidad....47
3.3. Alcance temporal....47
3.4. Finalidad....48
3.5. Fuente....48
3.6. Muestra: muestra no probabilística y análisis de datos numéricos....48
3.7. Técnicas....50
3.7.1. Entrevista a profundidad....50

3.7.2. Análisis FORD 50
3.7.3. Diseño CAD 51
3.7.4. Simulación fluidodinámica computacional 52
3.7.5. Diagrama de flujo de procesos 52
3.7.6. Diseño estadístico de experimentos 53
3.7.7. Interfaz gráfica programada de computadora 53
3.7.8. Análisis costo-beneficio 54
3.8. Matriz de validez 56
CAPÍTULO IV. PRESENTACIÓN, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS 62
4.1. Análisis de la categoría 1 66
4.1.1. Subcategoría: Diseño de sistemas de enfriamiento 67
4.1.1.1. Entrevista a profundidad 68
4.1.1.2. Análisis FORD 72
4.1.1.2.1. Diseño de sistemas de enfriamiento actuales 72
4.1.1.2.2. Funcionamiento de sistemas de enfriamiento existentes 74
4.2. Análisis de la categoría 2 76
4.2.1. Subcategoría: articulación robótica 77
4.2.2. Subcategoría: Sistema de enfriamiento 79
4.2.3. Subcategoría: Diseño del intercambiador de calor 80
4.2.3.1. Cálculo de las dimensiones del radiador 81
4.2.3.2. Diseño del radiador en SolidWorks 84
4.2.4. Subcategoría: Construcción del intercambiador de calor 90
4.3. Análisis de la categoría 3 97
4.3.1. Subcategoría: Análisis de la extracción de calor 98

4.3.2. Subcategoría: Pruebas experimentales 106
4.3.2.1. Pruebas del intercambiador de calor 107
4.3.2.1.1. Experimentos 108
4.3.3. Subcategoría: Análisis ANOVA con los datos de las simulaciones 118
4.3.3.1. Ejecución del diseño estadístico de experimentos 118
4.3.3.1.1. Prueba de normalidad 119
4.3.3.1.2. Tipo de prueba seleccionada 123
4.3.3.1.3. Ejecución del ANOVA en MiniTab 124
4.3.4. Subcategoría: Análisis costo-beneficio 131
4.3.4.1. Definición de costos 131
4.3.4.2. Decisión final 134
4.3.4.4. Basado en costos totales 134
4.3.4.5. Basado en pros y contras 134
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 135
5.1. Conclusiones 136
5.2. Recomendaciones 139
REFERENCIAS 140
APÉNDICES 146
Apéndice 1. Guía de Análisis FORD 147
Apéndice 2. Guía de entrevista a profundidad 149
Apéndice 3. Guía para el diseño, simulación, mecanizado CAD. 152
Apéndice 4. Guía para el diagrama de flujo de proceso. 153
Apéndice 5. Guía para el diseño estadístico de experimentos. 156
Apéndice 6. Guía para el análisis costo-beneficio 159
Apéndice 7. Cronograma 162

ANEXOS 165

Anexo 1: Carta de aval del tutor 166

Anexo 2. Carta de validación de instrumentos por expertos 167

Anexo 3. Carta aval profesor del curso IPRI-1414 Investigación dirigida 168

Anexo 4. Carta de revisión filológica 169

Anexo 5. Declaración Jurada 170

Anexo 7. Carta de Autorización para Uso y Manejo de los Trabajos Finales de Graduación. 171

Anexo 8. Resumen 180

RESUMEN 180

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de congruencia interna.....23

Tabla 2. Características de selección de la población 49

Tabla 3. Matriz de operacionalización 56

Tabla 4. Identificación de actores en presentación de resultados del instrumento de entrevista a profundidad 64

Tabla 5. Diseño de sistemas de enfriamiento actuales 73

Tabla 6. Funcionamiento de sistemas de enfriamiento existentes 75

Tabla 7. Datos y especificaciones iniciales del motor eléctrico.....81

Tabla 8. Datos y especificaciones del líquido del refrigerante (Aceite dieléctrico ISO-32) 81

Tabla 9. Condiciones ambientales.....99

Tabla 10. Condición de entrada.....100

Tabla 11. Condición de salida 100

Tabla 12. Condición de la pared.....100

Tabla 13. Resultados del comportamiento del fluido durante la simulación 103

Tabla 14. Resultados de las características termodinámicas durante la simulación 105

Tabla 15. Observaciones experimentales Experimento 2 111

Tabla 16. Observaciones experimentales del Experimento 3.....113

Tabla 17 Observaciones experimentales del Experimento 4.....115

Tabla 18. Resumen de la diferencia temperatura de entrada-salida del radiador en los Experimentos 2, 3 y 4 119

Tabla 19. Datos de varianza 124

Tabla 20. Agrupación mediante el método Tukey 126

Tabla 21. Media de las temperaturas en grados C° 127

Tabla 22. Estadísticas descriptivas.....128

Tabla 23. Estimación de la diferencia pareada.....128

Tabla 24. Prueba.....129

Tabla 25. Estadísticas descriptivas.....129

Tabla 26. Estimación de la diferencia pareada.....129

Tabla 27. Prueba.....129

Tabla 28. Estadísticas descriptivas.....130

Tabla 29. Estimación de la diferencia pareada.....130

Tabla 30. Prueba.....130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principios de la termodinámica 27

Figura 2. Transferencia de calor hacia una superficie 30

Figura 3. Esquema de sistema de enfriamiento 32

Figura 4. Intercambiador de calor 33

Figura 5. Sistema automatizado para la fabricación de automóviles. 37

Figura 6. Universidad Técnica Nacional. 42

Figura 7. Metodología del diseño. 76

Figura 8. Última versión del brazo robótico. 78

Figura 9. Última versión de la articulación robótica. 79

Figura 10. Diagrama de sistema de enfriamiento. 80

Figura 11. Intercambiadores de calor compactos 85

Figura 12. Medidas de las placas: 86

Figura 13. Propiedades del aluminio 87

Figura 14. Estructura dimensiones de la tubería 87

Figura 15. Diámetros de tubo frigorífico de cobre 88

Figura 16. Propiedades del aluminio. 89

Figura 17. Diseño final del radiador 89

Figura 18. Láminas de aluminio cortadas 91

Figura 19. Taladrado de las láminas. 92

Figura 20. Tubos de cobre cortados 93

Figura 21. Colocación de las láminas a los tubos. 94

Figura 22. Radiador terminado. 95

Figura 23. Diagrama de flujo del proceso de construcción del radiador. 96

Figura 24. Trayectoria del fluido mostrando la temperatura 101

Figura 25. Vista en el plano ZY de la temperatura del ambiente. 102

Figura 26. Temperatura de la tubería. 103

Figura 27. Temperatura de las placas. 104

Figura 28. Banco de pruebas 106

Figura 29. Distribución de la prueba experimental 107

Figura 30. Gráfico temperaturas versus tiempo: Experimento 1. 109

Figura 31. Gráfico presión de la bomba durante el Experimento 1. 109

Figura 32. Gráfico temperaturas versus tiempo: Experimento 2 110

Figura 33. Gráfico presión de la bomba durante el experimento 2 110

Figura 34. Gráfico temperaturas versus tiempo: Experimento 3 112

Figura 35. Gráfico presión de la bomba durante el Experimento 3 112

Figura 36. Gráfico temperaturas versus tiempo: Experimento 4 114

Figura 37. Gráfico presión de la bomba durante el Experimento 4 115

Figura 38. Gráfico temperaturas versus tiempo: Experimento 5 116

Figura 39. Gráfico presión de la bomba durante el Experimento 5 117

Figura 40. Gráfico de error de los sensores 118

Figura 41. Gráfico de prueba de normalidad Experimento 2 120

Figura 42. Gráfico de prueba de normalidad Experimento 3 121

Figura 43. Gráfico de prueba de normalidad Experimento 4 122

Figura 44. Gráfico de intervalos de los experimentos. 125

LISTA DE SIGLAS

ACT	Actividades de Ciencia y Tecnología
ANSI	American Nacional Standars Institute (Instituto Nacional de Normalización Estadounidense)
ARAD	Articulación Robótica de Alto Desempeño
Arcos-Lab	Laboratorio de Robots Autónomos y Sistemas Cognitivos
BLDC	Brushless Direct Current (Motor de corriente directa sin escobillas)
BMW	Bayerische Motoren Werke
CAD	Computer-Aided Design (Diseño asistido por computadora)
CFD	Computational Fluid Dynamics (Dinámica de Fluidos Computacional)
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency (Agencia de Proyectos de Investigación y Defensa Avanzada)
D.o.E	Design of Experiments (Diseño de experimentos)
FORD	Fortalezas, Oportunidades, Riesgos y Debilidades
ISO	International Organization for Standardization (Organización Internacional para la Normalización)
I + D	Investigación y Desarrollo
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos)
INII	Instituto de Investigación en Ingeniería
IROS	Intelligent Robots and Systems (Robots y sistemas inteligentes)
JKS-Lab	Jouhou Kougaku Systems Laboratory (Laboratorio de Sistemas Jouhuo Kougaku)
MICITT	Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones de Costa Rica
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organization (Organización de Desarrollo Nuevas Energías y Tecnología Industrial)
PMFS	Permanent Magnet Flux-Switching (Alternador de flujo magnético permanente)

TFG	Trabajo Final de Graduación
UCR	Universidad de Costa Rica
UTN	Universidad Técnica Nacional
3D	Tercera Dimensión

RESUMEN

El sistema de refrigeración es una de las partes más importantes de un robot, un correcto diseño le permite aumentar su capacidad, a la vez que reduce las posibilidades de un mal funcionamiento. En general, los sistemas de refrigeración para robots humanoides requieren de características especiales para no interferir en su óptimo funcionamiento; aspectos como el peso, el tamaño, los materiales y el posicionamiento de este sistema son cruciales para lograr la máxima eficiencia.

El problema actual en este diseño es que el sistema de enfriamiento necesita mantener su potencia para realizar tareas al levantar pesos pesados sin consecuencias como la reducción de la movilidad de la articulación y baja eficiencia del robot. Por lo cual, en este trabajo se estudian, analizan y descartan las opciones existentes de actuadores de motores eléctricos. Una vez que se obtuvieron las opciones viables, se procedió a realizar un diseño adecuado, mediante un estudio de dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) y se obtuvieron las medidas de extracción de calor.

Realizado el estudio, se logró determinar que este diseño es altamente eficiente al extraer calor de manera rápida, hasta 17,5 °C menos en los primeros dos minutos; además de mantener una temperatura constante que lo mantiene en equilibrio durante su funcionamiento, evitando caer en momentos críticos donde la temperatura sube a niveles que puedan afectar al robot a corto, mediano y largo plazo.

Palabras clave: robot humanoide, sistema de refrigeración, intercambiador de calor, transferencia de calor, dinámica de fluidos computacional, diseño.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional (UTN) se encuentra desarrollando el proyecto de diseño de un brazo robótico propioceptivo para extremidades robóticas con aplicaciones prácticas en robots humanoides en la UTN. Sin embargo, para el óptimo funcionamiento de cualquier robot, es necesario el conjunto de varios factores, entre uno de los más importantes destaca el sistema de enfriamiento. El objetivo principal del sistema de enfriamiento, como su nombre lo indica, es evitar que el motor se sobrecaliente, en especial al trabajar bajo una alta demanda; cuando se mantiene una adecuada temperatura, se obtiene como resultado una mayor eficiencia y, por lo tanto, una menor exposición a una posible falla definitiva del robot.

En lo que respecta a la problemática del proyecto del Laboratorio de Robótica de la UTN, radica en que los robots que necesitan una determinada potencia para realizar tareas que requieren levantar mucho peso generan una alta demanda energética. Las actuales soluciones se han basado en agregar reducciones mecánicas muy grandes, siendo esto una solución no viable, ya que agrega mucho peso y disminuye la movilidad, así como la eficiencia del motor.

Es necesario recalcar que un pilar fundamental de la ingeniería en producción industrial es la resolución de problemas, para la mejora continua, por este motivo, la presente investigación estuvo dirigida al análisis de un sistema de enfriamiento líquido moderno para articulaciones robóticas mediante un estudio dinámico computarizado, con el fin de dar una solución a la problemática descrita anteriormente. Para esto, se llevaron a cabo diferentes etapas que se basaron en estudiar, analizar y descartar las opciones existentes en el mercado de motores alrededor del mundo. Una vez que se obtuvieron las opciones viables, se procedió al diseño de posibles sistemas de refrigeración, estos se probaron en un prototipo de brazo robótico, se realizaron las mediciones de extracción de calor correspondientes a cada uno, así

como velocidad del fluido. Posteriormente, mediante un estudio y análisis estadístico de estos datos obtenidos, se demostró efectividad al reflejar que incrementó la eficiencia de extracción de calor, siendo clave para la toma de decisión final del sistema adecuado a la problemática inicial.

Por otra parte, el desarrollo de este trabajo final de graduación en ingeniería permite abrir el camino de la investigación para la carrera de Licenciatura en Ingeniería en Producción Industrial de la UTN, ya que, actualmente, en el ámbito nacional, no existe un sistema de enfriamiento que se adecue a las necesidades de la articulación robótica por lo que es de interés académico; incorpora el área de investigación de la innovación industrial a través de una línea de investigación y desarrollo de productos, mediante el estudio, análisis y aplicación de mecanismos de enfriamiento aptos para este proyecto.

Junto con la finalización del proyecto del brazo robótico, se aspira a, en algún momento, patentar el mecanismo, por lo que el interés principal en el ámbito profesional es brindar a las diferentes compañías una opción eficiente del mecanismo que cumpla con la calidad y desempeño apto para tareas que requieran el uso de este tipo de robot humanoide.

La presente investigación está estructurada en capítulos, primero, se encuentra el capítulo número uno, consiste en la introducción, justificación, estado de la cuestión, planteamiento del problema, objetivos y matriz de congruencia interna. El capítulo dos abarca el marco teórico y marco contextual; seguidamente, el capítulo tres comprende el marco metodológico. El capítulo cuatro comprende la presentación, interpretación y discusión de los resultados y en el último capítulo, el quinto, se presentan las conclusiones y las recomendaciones.

1.1. Área de estudio y justificación

1.2.1. Área de estudio

En un ambiente industrial que cada vez es más competitivo y globalizado, el tema del desarrollo en investigación e innovación de productos y servicios es necesario para la mejora continua, en especial en un ambiente que continuamente está cambiando y es muy tecnológico, por este motivo, es casi un hecho obligatorio para mantener la competitividad.

El desarrollo de nuevos productos se ha convertido en un factor clave para destacar en la industria, puesto que, en los últimos años, ha venido acompañado de un cambio de perspectiva y una preocupación por el diseño, investigación, innovación y desarrollo de nuevos productos; lo cual consiste, según lo que dice el artículo titulado: *Innovación de producto y procesos industriales*, en generar ideas que suponen aplicar un cambio, discreto o sustancial a un producto existente, o bien crear uno totalmente nuevo, con la finalidad de no solo ofrecer algo novedoso al mercado, sino también para solucionar un problema en la industria y generando así un valor para los clientes, de manera que se consigan unos resultados (económicos, técnicos y sociales) a largo plazo (Lizuain y Muñiz, 2018, p. 68).

Por tanto, la presente investigación se centra en el área de estudio titulada innovación industrial, bajo la línea de investigación llamada: investigación y desarrollo de productos y servicios. (Licenciatura en Ingeniería en Producción Industrial, comunicación personal, 2020).

Asimismo, este trabajo final de graduación se relaciona con el área y línea de investigación ya mencionadas, al permitir desarrollar un análisis que aplica habilidades, destrezas y actitudes para solucionar un problema y tomar decisiones, empleando conocimientos teóricos y prácticos en diversas áreas de la ingeniería, como lo es la

termodinámica, mecánica de fluidos, estadística, etc., además de contribuir al conocimiento en el desarrollo de la innovación y creatividad en productos, generar ideas que le aporten a la industria, de tal forma que esas ideas se materialicen en realidades con aportes significativos al sector productivo, tecnológico, social y educativo. Conjuntamente colaborando a la creación de conocimiento científico, tecnológico y académico en la carrera de Licenciatura en Ingeniería en Producción Industrial de la UTN.

1.2.2. Justificación

Este proyecto se desarrolla como parte de la Licenciatura en Ingeniería en Producción Industrial, bajo el área investigativa de innovación industrial y en la línea de investigación llamada: investigación y desarrollo tecnológico de productos y servicios, bajo un estudio, análisis y aplicación de herramientas; con la cual se pretende responder en forma asertiva a las necesidades del problema y tomar decisiones para así dar la solución más factible a este.

Para las implicaciones prácticas, esta investigación permite estudiar las características o propiedades del prototipo preliminar que se adapte y cumpla la función de enfriar efectivamente la articulación robótica hueca, mediante el estudio, diseño, simulación y comparación de datos, para el funcionamiento del brazo robótico; ya que uno de los mayores problemas es que ningún otro sistema existente se adapta a la articulación, debido a que el sistema actual requiere mucho espacio y genera mucho peso, reduciendo la movilidad de esta.

Por otra parte, en las implicaciones teóricas, la investigación permite descartar ideas utilizadas en otros componentes de los actuales sistemas utilizados en los robots humanoides, brindando una mejora al momento de definir materiales y procesos para el futuro ensamble de un eventual brazo robótico.

La relevancia institucional se centra en que este estudio no solo se basa en proponer un prototipo, sino que también permite aportar conocimiento sobre sistemas de enfriamiento en el campo de la robótica y contribuir con la UTN al desarrollo de conocimiento en ingeniería, además del beneficio-impacto de incentivar la innovación en el desarrollo de productos en la industria; asimismo, a la creación de un posible producto innovador que conlleva un nuevo proceso, que podría convertirse en una nueva patente de la Universidad.

Por lo que, actualmente, en la UTN se encuentra en desarrollo el programa (Diseño de un brazo robótico propioceptivo para extremidades robóticas con aplicaciones prácticas en robots humanoides), en la carrera de Licenciatura en Ingeniería Electrónica, la cual consiste en la creación de un brazo robótico con cualidades de manipulación de objetos pesados en la vida cotidiana; sin embargo, se ha encontrado con cierta dificultad con respecto a una solución óptima para el sistema de enfriamiento del mismo. Por lo que el aporte de la ingeniería en producción industrial en esta investigación se centra en la necesidad de indagar, estudiar y analizar mejoras acerca de sistemas de enfriamiento líquido en motores para articulaciones robóticas, que se adapten a las especificaciones de la articulación del robot humanoide.

1.2. Estado de la cuestión

1.2.1. Estudios internacionales

El artículo titulado *Development of humanoid robot system for disaster response through team NEDO-JSK'S approach to DARPA*, desarrollado por Kakiuchi et al. (2015), parte de que, antes de pensar en cualquier otro método de enfriamiento en motores eléctricos, es necesario conocer un poco cómo trabajan los robots humanoides y su estructura que simula un cuerpo humano, lo cual utiliza motores que proveen de movimiento las articulaciones. Uno de los robots en desarrollo es JAXON, para uso en desastres presentado en Seúl, Corea del Sur.

> We decided to develop a humanoid robot named "JAXON" for a humanoid robot platform for disaster response with listed three features. It was decided to use existing powerful motors with a water-cooling driver system, in order to achieve motions comparable performance with human. This feature derived from developed humanoid robot "STARO". (Kakiuchi et al., 2015, p.806)

Kakiuchi et al. (2015) presentan una estructura que simula el cuerpo humano, explica cómo los motores proveen movimiento a las articulaciones robóticas, brinda visión de cómo están conformados estos mecanismos, sus características y propiedades. Además, como se mencionó anteriormente en la introducción de la cita, se debe conocer un poco cómo trabajan los robots humanoides hoy en día y su estructura que simula un cuerpo humano, así como la utilización de motores que provee movimiento de las articulaciones y también qué métodos de enfriamiento de motores utilizan.

El artículo titulado *This Robot Can Do More Push-Ups Because It Sweats*, desarrollado por Ackerman (2016), comenta que uno de los problemas con los robots, en especial los más dinámicos, es el sobrecalentamiento de sus motores, por lo que, en la Universidad de Tokio, Japón, construyeron un robot humanoide denominado KENGORO, el cual posee un mecanismo que simula la sudoración para controlar la temperatura de sus motores eléctricos.

> Engineers solve this heat-generating problem in most mechanical systems by using fans, heat sinks, and radiators, which means that you've got all this dedicated cooling infrastructure that takes up space and adds mass. At the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) this week, Japanese researchers presented a novel idea of how to cool humanoid robots in a much more efficient way: Design them to be able to sweat water straight out of their bones. (Ackerman, 2016, párr. 4)

Ackerman (2016) explica cómo ha innovado la industria de la robótica, así como el avance en temas de la estructura de los robots humanoides, dando énfasis en crear piezas que reduzcan en peso, volumen y sean anatómicamente similares a las de los seres humanos; por lo que, con este sistema de enfriamiento, en el que recrean la acción fisiológica de sudar, que han implementado en el robot, da una pauta de cómo este nuevo sistema funciona mejor que la refrigeración por aire y del método tradicional de la circulación de agua a través del canal interior. De igual manera, muestra un sistema que no entorpece a la hora de realizar las acciones del robot; esto último es lo que busca la presente investigación, pero aun así se dice no es tan eficaz como el uso de radiadores o ventiladores tradicionales, que se encuentra en muchas máquinas.

En el documento titulado *Direct Liquid Cooling in Low-Power Electrical Machines: Proof-of-Concept,* desarrollado por Lindh et al. (2016), se indica que, además de los otros métodos mencionados anteriormente (como el del robot humanoide KENGORO) y otros como el enfriamiento para máquinas eléctricas convencionales que incluye aletas de la carcasa, se presenta también el ventilador montado en el eje y camisa de agua. En estos casos, el calor de la pérdida de cobre de los devanados debe pasar, ya sea el núcleo del estator o el aire entre los devanados y el alojamiento, pero estos métodos a veces no son lo suficientemente eficientes.

Existe este método que es refrigeración líquida directa en la gestión térmica en máquinas de imanes permanentes de flujo axial. El cual utiliza un motor de prueba con bobinados helicoidales que integra el motor con un cerrado circuito de líquido refrigerante, este método de enfriamiento propuesto es factible, además, para proporcionar mejoras significativas a la máquina de gestión térmica.

> This paper evaluates the feasibility of a direct liquid cooling approach in the thermal management of an axial flux permanent-magnet machine. To demonstrate the cooling method, a test motor was fitted with helical tooth coil windings formed from a hybrid conductor comprising a stainless-steel coolant conduit tightly wrapped with a stranded Litz wire. The motor is a 100-kW permanent-magnet, axial-flux, double-stator, single-rotor machine. The proof of concept integrated the motor with a closed liquid coolant loop, appropriate instrumentation, and a data acquisition system. The general performance of the motor was examined at various power levels using polyalphaolefin oil as the cooling fluid. The results show the proposed cooling

> method to be feasible, and furthermore, to provide significant improvements to the machine thermal management. (Lindh et al., 2016, p.1257)

Este artículo explica el desarrollo de otros sistemas de enfriamiento en motores de robots humanoides como los son el enfriamiento para máquinas eléctricas convencionales que incluye aletas de la carcasa, ventilador montado en el eje y camisa de agua, el sistema de sudoración en el robot KENGORO, bobinados helicoidales que integra el motor con un cerrado circuito de líquido refrigerante. Este método de enfriamiento propuesto es factible, además, para proporcionar mejoras significativas a la máquina de gestión térmica. Como desventaja de este método, se tiene que el mecanismo ocupa mucho espacio, por lo cual entorpecería la movilidad de la articulación.

Adicionalmente, Ackerman (2016) indica que investigadores del Laboratorio JSK de la Universidad de Tokio, dirigidos por el profesor Masayuki Inaba, están tratando de descubrir cómo agregar un sistema de enfriamiento a su robot, ya que simplemente no había espacio para agregar enfriamiento activo de agua con tubos, un radiador y ventiladores.

> The researchers, from the University of Tokyo's JSK Lab, led by Professor Masayuki Inaba, were trying to figure out how to add a cooling system to their 1.7-meter tall, 56-kilogram musculoskeletal humanoid named Kengoro (who joins Kojiro and Kenshiro as part of the JSK robot family). Kengoro is already stuffed to the brim with structural components, circuit boards, gears, and 108 motors, and there was simply no room to add active water cooling with tubes and a radiator and fans. The researchers started looking at how they could make better use of Kengoro's existing components, and they came up with the idea of using the robot's skeletal structure (its metal frame) as a coolant-delivery system. (Ackerman, 2016, párr. 3)

Ackerman (2016) menciona cómo varios investigadores, específicamente en Japón, han empezado a tratar que un sistema de enfriamiento sea apto para el robot humanoide que están desarrollando, ya que cuentan con el problema de falta de espacio para mantener frío al robot, en el que simplemente no había espacio para agregar enfriamiento activo de agua con tubos, un radiador y ventiladores, ya que muchos utilizan los procedimientos clásicos para enfriar la mecánica y electrónica de los robots, como ventiladores, disipadores térmicos o enfriamiento líquido mediante un radiador, pero esos sistemas añaden peso y aumenta su complejidad a la hora de realizar sus movimientos; por lo que es importante en esta investigación, seguir de cerca el trabajo de estos ingenieros para así encontrar un camino más claro.

Asimismo, en el artículo de Zhang et al. (2017) titulado *Coupled Magnetic-Thermal Fields Analysis of Water Cooling Flux-Switching Permanent Magnet Motors by an Axially Segmented Model,* se encontró en otros sistemas que la temperatura varía mucho en el Alternador de Flujo Magnético Permanente (PMFS por sus siglas en inglés), ya que están ubicados entre el sistema de enfriamiento de agua y los devanados de armadura que transportan el calor generado por la pérdida de cobre.

> In the permanent magnet flux-switching (PMFS) motors, both magnets and concentrated armature windings are located on the stator, which facilities the accommodation of a water-cooling system. It is found that the temperature varies greatly in the PMs, since they are located between the water-cooling system and armature windings that carry the heat generated by copper loss. Thus, based on the finite-element analysis (FEA), an axially segmented magnetic-thermal coupled-fields model of PMFS motor is proposed, which counts in the variations of flux density,

> iron loss and temperature distributions in the axial direction. By dividing the motor into axial segments and neglecting the temperature variation along the axial direction in each segment, this new model enables the electromagnetic and thermal behaviors to be predicted more accurately than 2D coupled-fields model, meanwhile much faster than a traditional synchronous 3D coupled-fields model when similar accuracy is obtained. Finally, the results predicted by the new axially segmented model are validated by experimental measurements, confirming the feasibility of the proposed model. (Zhang et al., 2017, p. 1)

Es importante mencionar que Zhang et al. (2017) han utilizado un nuevo modelo que predice con mayor precisión los comportamientos térmicos y electromagnéticos del motor, además de que siguen el proceso que se está utilizando en esta investigación, que es el de analizar los resultados mediante mediciones experimentales, confirmando la viabilidad del modelo propuesto.

A continuación, en los siguientes artículos se describe cómo las compañías de automóviles han buscado métodos para mejorar la extracción de calor de los motores para evitar su sobrecalentamiento. El artículo escrito por García (2019), titulado como *BMW examina nuevos sistemas de refrigeración para la recarga de vehículos eléctricos*, dice que otras compañías como BMW buscan el mismo objetivo de nuevos sistemas de refrigeración y este debe estar disponible dentro del período limitado de carga rápida; también debe ser amigable con el ambiente. Una de las tecnologías en la mira son tecnologías magnetocalóricas, un sistema que implica el uso de un campo magnético variable y sistemas de enfriamiento electroquímico.

> BMW está buscando soluciones tecnológicas para implementar sistemas de refrigeración alternativos para la recarga rápida de las baterías de sus coches eléctricos. Para ello ha abierto un proceso de selección de alternativas, medioambientalmente no dañinas, que reduzcan el calor que se produce durante este proceso y no causen molestias en el entorno provocadas por el ruido del funcionamiento de elementos mecánicos como ventiladores y disipadores. (García, 2019, párr. 7)

García (2019) desarrolla el tema de la implementación tecnológica de nuevos sistemas de refrigeración en motores de automóviles que, a pesar de no ser utilizado en robots humanoides, permite conocer diferentes métodos, los cuales, posteriormente, los diseñadores utilizan para satisfacer la necesidad de una potencia de enfriamiento alta. Y comparten el mismo objetivo, siendo este el que los nuevos sistemas de refrigeración puedan ser eficientes, adaptables y aprovechen mejor los recursos.

García (2019) también indica que otra tecnología en consideración es el enfriamiento por los métodos de compresión, como el termoacústico, que usando un altavoz crea sonido en un tubo hueco lleno de gas que crea una compresión mecánica expandiendo el gas refrigerante. También está la regulación térmica por absorción que produce frío al comprimir sustancias que absorben calor cuando cambian de líquido a gaseoso y, por último, el enfriamiento por vapor, que enfría el aire mediante la evaporación de agua, parecido al utilizado por el robot KENGORO.

> Otras posibilidades son las ofrecidas por los métodos de compresión. Entre ellas el enfriamiento termoacústico, mediante un altavoz que crea sonido en un tubo hueco lleno de gas que crea una compresión mecánica expandiendo el gas refrigerante. El

> enfriamiento por absorción produce frío al comprimir sustancias que absorben calor cuando cambian de fase de líquido a gaseoso, y, por último, el enfriamiento por vapor, que enfría el aire mediante la evaporación de agua. BMW está abierto a recibir proyectos que cumplan con estos criterios y a nuevas propuestas de métodos de enfriamiento innovadores.
>
> Todas ellas serán evaluadas por BMW para posteriormente desarrollar la tecnología con el apoyo de su I+D. Las propuestas deben realizarse a través de NineSights, una plataforma colaborativa para el desarrollo de soluciones innovadoras en diferentes cambios tecnológicos. (García, 2019, párr. 11)

En el artículo de García (2019) se destaca la gran labor realizada con KENGORO, el cual usa la regulación térmica por absorción que produce frío al comprimir sustancias que absorben calor cuando cambian de líquido a gaseoso, por lo que este método se puede aplicar en la industria de la robótica, también, en este caso, a nivel de la industria automotriz y permite solucionar la problemática de la regulación térmica en motores.

Como se menciona anteriormente, la regulación térmica para el funcionamiento de los robots es muy importante para que pueda realizar acciones de manera eficiente y sin sobrecalentamiento, puesto que requieren operaciones de alta carga, por lo que Ito et al. (2014) hablan de robots humanoides que usan un sistema refrigerado por agua de doble motor en la parte de la piernas, el cual está sellado y acoplado al motor mediante adhesivo de sellado, y el interior se divide en 14 bloques donde el agua circula. Por esa razón, los motores se enfrían eficientemente sin que se desperdicie agua y quede empozada.

> … we describe a water-cooled double motor system. Some research improves the joint torque by double motor … The feature of our research is water-cooled

> system … The unit is sealed and coupled to the motor by sealing adhesive, and the inside is separated into 14 blocks where water is circulated. That's why motors are cooled efficiently without puddle layer. Another feature is the driving system of double motor. One motor is position controlled, and another motor is current controlled, which means current same as position-controlled motor's one flows. This performs torque assist to the position control motor and enable double motor to prevent an increase in the internal force which occurs when two motors are position controlled. (Ito et al., 2014, p. 2)

Ito et al. (2014) mencionan un método que se basa en refrigerar los motores de la articulación inferior del robot humanoide, mediante un encamisado en los motores, el cual demuestra una alta eficiencia, por ende, se considera este el método principal con el cual se compara el diseño del sistema de enfriamiento que se realiza en esta tesis, además de ser el punto de partida de todo el trabajo final de graduación.

Parte importante del desarrollo en sistemas de enfriamiento es conocer los principios de ingeniería que se implican en dicho diseño. En el artículo llamado *Elementos de diseño de sistemas de enfriamiento de motores de combustión interna*, se habla de conceptos como termodinámica, mecánica de fluidos y de transferencia de calor, que serán desarrollados más adelante en el marco teórico.

> … se describen los principios de ingeniería mecánica implicados en el diseño de un sistema de enfriamiento de un motor de combustión. Se consideran los conceptos de termofluidos y de transferencia de calor relacionados. El trabajo aquí presentado tiene una finalidad didáctica, muy ilustrativo para el ingeniero o el tecnólogo mecánico, que pueden ver en los sistemas de enfriamiento de los motores un prototipo de sistema

> mecánico, como lo son en efecto todos los sistemas y mecanismos de los motores de combustión. (Romero y Carranza, 2007, p.1)

Para esta investigación, el artículo de Romero y Carranza (2017) ayuda a ver de manera didáctica y muy ilustrativa para el desarrollo ingenieril o el tecnológico, los sistemas de enfriamiento de los motores, esto ayuda al diseño del prototipo de dicho sistema.

Es importante conocer cómo diferentes investigaciones sobre sistemas de enfriamiento han aportado a la evolución de estos, lo malo es el hecho de que la mayoría de estos sistemas están basados en motores de combustión, pero la tesis titulada *Diseño y construcción de los sistemas de refrigeración de un vehículo fórmula SAE eléctrico*, de Cabrera y Tigre (2016), basa su diseño en un motor eléctrico, el cual es el que usa la articulación para la que se diseña el sistema de enfriamiento.

> Al tratarse de un motor eléctrico la concepción es distinta, pues si bien un motor de combustión interna es más eficiente al trabajar en una temperatura sobre los 90°C, el motor eléctrico es todo lo contrario. Tanto un motor eléctrico del tipo asincrónico, como un controlador trifásico son más eficientes mientras más fríos se encuentren sus componentes internos. Por lo tanto, un sistema de refrigeración que mantenga la temperatura de funcionamiento dentro del rango establecido por los fabricantes de estos dos elementos permitirá que los mismos trabajen a máxima eficiencia, garantizando el correcto desempeño del monoplaza. (Cabrera y Tigre, 2016, p. 1)

Lo indicado por Cabrera y Tigre (2016) permite ver el comportamiento de un motor eléctrico y cuáles factores deben tomarse en cuenta a la hora de diseñar su sistema de

enfriamiento, además de las fórmulas necesarias de las cuales salen los cálculos del radiador, ventilador y bomba del sistema.

1.2.2. Estudios nacionales

Según el artículo de Mora (2019), en el Laboratorio de Investigación en Robots Autónomos y Sistemas Cognitivos (ARCOS-Lab) de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica, se desarrolla un proyecto de un robot humanoide con capacidades avanzadas de manipulación, que le permita realizar tareas de maneras flexibles y seguras.

> Para lograr incorporar un robot en tareas conjuntas con personas, debe considerarse la diversidad de los ambientes humanos, además de los objetos presentes. El robot debe saber localizarse, comunicarse (entender intenciones y emociones) e interactuar con el ambiente físico (objetos y personas). Para conseguirlo, la máquina requiere un hardware especializado, que sea seguro con el ambiente y un software que le permita ser lo suficientemente flexible para lograr realizar una gran cantidad de tareas cotidianas en condiciones variables. Lo anterior es el objetivo en el que trabaja el Laboratorio de Investigación en Robots Autónomos y Sistemas Cognitivos (ARCOS-Lab), de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica (UCR). Su coordinador, Federico Ruiz Ugalde, indicó que el proyecto más importante que desarrollan en este momento es un robot humanoide con capacidades avanzadas de manipulación, que le permita realizar tareas de maneras flexibles y seguras. Algunas de las partes del robot se han adquirido con dicho tipo de control, como los brazos y las manos; mientras otras no existen en el mercado, como la plataforma omnidireccional y el torso. (Mora, 2019, párr. 5)

Basado en lo que indica Mora (2019), se puede deducir que, en el tema de sistemas de enfriamiento líquido en motores para robots humanoides en Costa Rica, la información es poca, solo se habla del sistema tradicional de enfriamiento usando radiadores y ventiladores de gran tamaño para motores grandes, por lo que este trabajo de investigación pretende diseñar un modelo de enfriamiento que no adicione peso a las extremidades del robot humanoide y que encaje lo mejor posible, para que no entorpezca las acciones; el cual permita el libre movimiento que tiene un ser humano, que sea estéticamente agradable, además, sea innovador y cumpla con su función de evitar el sobrecalentamiento de los motores. Por lo que no es de conocimiento que haya una solución térmica del que se plantea en este trabajo.

1.2.3. Conclusiones del apartado

El documento desarrollado por Kakiuchi et al. (2015) aporta el conocimiento de cómo funcionan los robots humanoides, su composición, propiedades, la determinación de materiales, tamaño y peso, para lograr que sea lo más similar al humano, así como hacer que suden al igual que lo hace un ser viviente para lograr un desempeño eficiente. A su vez, en el trabajo final de graduación se ve enriquecido, gracias a lo que indica el profesor Masayuki Inaba (citado por Ackerman, 2016); quien, en su estudio, trata de descubrir cómo agregar un sistema de enfriamiento a su robot, ya que simplemente no había espacio para agregar enfriamiento activo de agua por medio de tubos, un radiador y ventiladores.

En el aspecto nacional, se encontró que Acros-Lab son quienes se encuentran desarrollando el proyecto de un robot humanoide con capacidades avanzadas de manipulación, que le permita realizar tareas de maneras flexibles y seguras, esto en el Laboratorio de Investigación en Robots Autónomos y Sistemas Cognitivos (Arcos-Lab) de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica (Mora, 2019).

1.3. Problematización

La robótica a lo largo de las décadas ha sido de gran ayuda para la humanidad, en el ámbito de la industria no es la excepción, un robot, a diferencia de una máquina, es capaz de modificar su tarea por realizar (Velásquez, 2015, p. 1). Por este motivo, para la industria son tan importantes, ya que son ideales para el mundo cambiante y exigente.

Sin embargo, son mecanismos complejos que están expuestos a altas temperaturas según el uso que se le dé, dependiendo de la función, deben adaptarse los mecanismos de enfriamiento para que no interfiera en las funciones regulares. Según un estudio realizado por el profesor Masayuki Inaba (citado por Ackerman, 2016), el espacio disponible para agregar dispositivos que regulen la temperatura es muy restringido para los sistemas de enfriamiento tradicionales de radiadores, ventiladores y activo de agua mediante tubos.

Por este motivo, el Laboratorio de Robótica de la UTN, en conjunto con la carrera de Licenciatura en Ingeniería Electrónica y la carrera de Licenciatura en Ingeniería en Producción Industrial de esa misma institución, han comenzado la respectiva investigación para desarrollar un sistema de enfriamiento que se adecue a las necesidades de una articulación de un robot colaborativo a las personas, en Costa Rica; a pesar de que la información es poca, ya que se ha implementado el sistema tradicional de enfriamiento usando radiadores y ventiladores de gran tamaño.

Dicha investigación se realiza con el fin de ser la extremidad robótica líder en el desarrollo de actividades que requieren una alta exigencia energética, al realizar labores de manipulación en aplicaciones prácticas en robótica en general, a nivel nacional e internacional, caracterizada por su alta eficiencia energética, usando equipos de mecanizado y manufactura de última generación, cuyo desempeño reúna estándares de alta calidad, lo cual le permita optar por certificaciones internacionales de relevancia estratégica. Esto según

la visión del proyecto que se presenta al programa de investigación de la UTN, además, la misión de generar nuevo conocimiento en el área de robótica en general, por medio de la investigación científica sobre el diseño, prototipado y construcción de extremidades robóticas, haciendo uso del método científico y la integración de estudiantes de diversas carreras de la UTN.

La investigación que se realiza en el Laboratorio de Robótica de la UTN, por parte de los investigadores Rodríguez y Ruiz (2018), establece que se han hecho pruebas experimentales usando la simulación CFD (Computational fluid dynamics), y se obtiene que fue posible forzar líquido a través del devanado de un motor eléctrico BLDC, que se probó en dos escenarios. Uno mostró una mejora en la extracción de la cabeza del 19%, en el segundo escenario la mejora de la extracción de la cabeza fue del 25% ambos a 100 °C. (Rodríguez y Ruiz. 2018, p.8).

Ahora, concretamente como problemática principal, se observa que existe la falta de un sistema de enfriamiento líquido que incremente la extracción de calor de un brazo robótico propioceptivo para extremidades robóticas con aplicaciones prácticas en robots humanoides que desarrolla la UTN, ya que se busca que el sistema aumente la capacidad del motor para que realice tareas que requieran un fuerte demanda de energía y se evite el sobrecalentamiento, además, que se adapte a la articulación robótica y no genere un peso extra. Por ende, también se deben realizar pruebas experimentales y analizar sus resultados para poder llegar a un posible prototipo que dé solución al problema.

1.3.1. Pregunta problema

Por lo anteriormente expuesto, en el presente documento se plantea como pregunta de investigación: ¿cómo aumentar la extracción de calor en una articulación robótica hueca,

al realizar tareas de alta demanda energética en un ambiente simulado, en el Laboratorio de Robótica de la UTN, durante el periodo 2020-2022?

1.3.2. Limitaciones

Dentro de las principales limitaciones que representa el desarrollo de esta investigación, se encuentra la poca información con la que se cuenta, ya que es un tema de gran innovación a nivel nacional e internacional. Se necesita partir de otras investigaciones lo más similares posibles para llevar a la práctica y estudio.

Por otra parte, el tema de costos representa una limitación para el desarrollo final del proyecto, ya que se van a realizar las pruebas necesarias en el laboratorio, para lo que se requiere acceso a materiales, fluidos y piezas que son de difícil acceso o costosos; a su vez, el requerimiento de licencias de *software* de elevados precios, ligados al tiempo necesario para la elaboración de las simulaciones en estos programas.

1.3.3. Alcances

Este trabajo de investigación tiene como meta final diseñar un sistema de enfriamiento líquido para articulaciones robóticas que permita la extracción de calor de un robot humanoide. Para llevarlo a cabo, es necesario hallar las posibles soluciones para, posteriormente, llevarlas al laboratorio y realizar un prototipo por medio de la impresión 3D, con el fin de demostrar de manera experimental el sistema de enfriamiento.

1.3.4. Temporalidad

La ejecución del proyecto de graduación se lleva a cabo en los meses de agosto del año 2020 a mayo del año 2021, en específico la parte experimental en el Laboratorio de Robótica ubicado en el tercer piso de la Torre de Laboratorios de la UTN.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar un sistema de enfriamiento líquido para articulaciones robóticas, con el fin de que aumente la extracción de calor al realizar tareas de alta demanda energética mediante un estudio dinámico de fluidos en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional, durante el periodo 2020-2022.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Definir los métodos actuales más relevantes de la refrigeración térmica en motores, máquinas eléctricas y robots humanoides, mediante un estudio comparativo de diseños, funcionamiento, problemas y limitaciones en sistemas de refrigeración térmica existentes a nivel nacional e internacional, con el fin de conocer las pautas que más se adapten al diseño que se desea.
2. Realizar un diseño en 3D de un intercambiador de calor del sistema de enfriamiento para articulaciones robóticas humanoides, mediante el diseño asistido por computadora, con el criterio de modificación de la pieza para la optimización de masa e intercambio de calor, con el fin de obtener un prototipo que se ajuste a las necesidades descritas en el planteamiento de problema.
3. Demostrar el comportamiento térmico del prototipo de forma experimental, mediante un simulador dinámico de fluido y junto con un diseño estadístico de experimentos para el análisis de los datos obtenidos de la simulación, con la finalidad de conocer si el prototipo cumple con las especificaciones requeridas.

1.6. Matriz de congruencia interna

Tabla 1.
Matriz de congruencia interna

Título	Problema	Objetivo general	Objetivos específicos	Preguntas de investigación
Análisis de un sistema de enfriamiento líquido moderno para articulaciones robóticas mediante un estudio dinámico (CFD) en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional, durante el periodo 2021.	¿Cómo aumentar la extracción de calor en una articulación robótica hueca al realizar tareas de alta demanda energética en un ambiente simulado, en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional, durante el periodo 2021?	Analizar un sistema de enfriamiento líquido para articulaciones robóticas, con el fin de que aumente la extracción de calor al realizar tareas de alta demanda energética mediante un estudio dinámico de fluidos en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional, durante el periodo 2021.	Definir los métodos actuales más relevantes de la refrigeración térmica en motores, máquinas eléctricas y robots humanoides, mediante un estudio comparativo de diseños, funcionamiento, problemas y limitaciones en sistemas de refrigeración térmica existentes a nivel nacional e internacional, con el fin de conocer las pautas que más se adapten al diseño que se desea.	¿Cuáles son los métodos actuales más relevantes de la refrigeración térmica en motores, máquinas eléctricas y robots humanoides?
			Realizar un diseño en 3D de un intercambiador de calor del sistema de enfriamiento para articulaciones robóticas humanoides, mediante el diseño asistido por computadora, con el criterio de modificación de la pieza para la optimización de la masa e intercambio de calor, con el fin de obtener un prototipo que se ajuste a las necesidades descritas en el planteamiento de problema.	¿Por qué es importante el diseño del prototipo de un intercambiador de calor para articulaciones robóticas?
			Demostrar el comportamiento térmico del prototipo de forma experimental, mediante un simulador dinámico de fluido y junto con un diseño de estadístico experimentos para el análisis de los datos obtenidos de la simulación, con la finalidad de conocer si el prototipo cumple con las especificaciones requeridas.	¿Cómo se demuestra el comportamiento térmico del prototipo de forma experimental?

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Marco conceptual

En esta parte de la investigación, se centra en el conjunto de ideas, procedimientos y teorías que guían la labor investigativa, además de ser el eje integrador de todo el proceso de investigación. No se puede elaborar un diseño metodológico con el cual probar las hipótesis. En esta parte, se identifican las fuentes primarias y secundarias sobre las cuales se sustenta la investigación, además, permite la descripción del problema donde se integra la teoría con la investigación y los factores que se estudian, funcionando como un instrumento fundamental para el análisis de los problemas de investigación. Se basa, principalmente, en los planteamientos elaborados por autores que estudian diferentes áreas de ciencias aplicadas a la ingeniería.

2.1.1. La termodinámica

Cengel y Boles (2014) definen el concepto como la ciencia que estudia el comportamiento de la energía, además, dicen que es de los primeros esfuerzos por convertir el calor en energía; proviene de las palabras griegas *therme*, que significa calor y *dynamis* que significa fuerza. Recientemente, se interpreta de manera más amplia para poder incluir los aspectos de la energía y sus transformaciones, incluida la generación de potencia, la refrigeración y las relaciones entre las propiedades de la materia, en esta área se describe cómo la materia en cualquiera de sus fases (sólido, líquido, gaseoso) va transformándose. Y estudia los procesos de transferencia de calor, una de las varias formas de la energía.

> La termodinámica se puede definir como la ciencia de la energía. Aunque todo el mundo tiene idea de lo que es la energía, es difícil definirla de forma precisa. La energía se puede considerar como la capacidad para causar cambios. El término

> *termodinámica* proviene de las palabras griegas *therme* (calor) y *dynamis* (fuerza), lo cual corresponde a lo más descriptivo de los primeros esfuerzos por convertir el calor en energía. En la actualidad, el concepto se interpreta de manera amplia para incluir los aspectos de energía y sus transformaciones, incluida la generación de potencia, la refrigeración y las relaciones entre las propiedades de la materia. (Cengel y Boles, 2014, p.3)

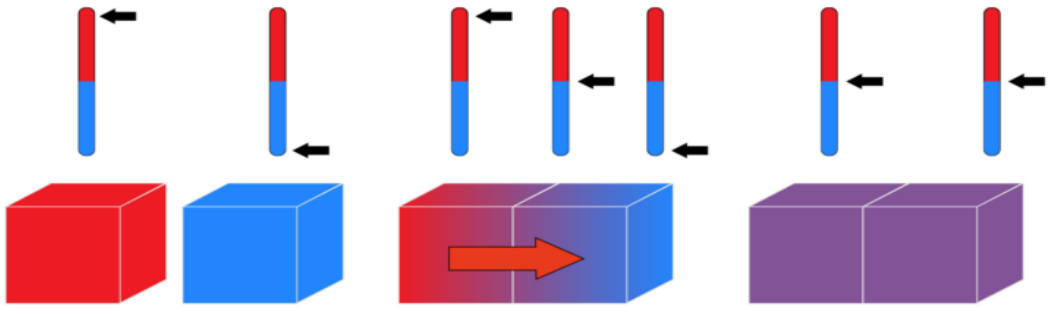
Consecuentemente, este término es importante de conocer, pues se usa mucho en el estudio de los cambios de fase de las diferentes sustancias, en la construcción de máquinas térmicas, por ejemplo: motores que funcionan con combustible, refrigeradoras (sistemas de enfriamiento), así como en el control del rendimiento de reacciones energéticas y en las propiedades térmicas de los sistemas, ya sea dilataciones, contracciones y cambios de fase. A nivel industrial, la termodinámica aplica sus principios al estudio de los procesos que desarrollan máquinas, instalaciones térmicas, la producción, el transporte, las transformaciones y el uso del calor. Su importancia en los sistemas de refrigeración o ciclo de refrigeración es primordial, puesto que se basa totalmente en la termodinámica: está relacionado a la remoción del calor de un cuerpo (objeto o sustancia), transfiriéndolo para otro.

2.1.2. Principios de la termodinámica

Este concepto se complementa con el anterior, ya que la termodinámica se basa en cuatro leyes principales: el equilibrio termodinámico (conocida como la ley cero), el principio de conservación de la energía (primera ley), el aumento temporal de la entropía (segunda ley) y la imposibilidad del cero absoluto (tercera ley).

> Una de las más importantes y fundamentales leyes de la naturaleza es el principio de conservación de la energía. Éste expresa que, durante una interacción, la energía puede cambiar de una forma a otra, pero su cantidad total permanece constante. Es decir, la energía no se crea ni se destruye. Una roca que cae de un acantilado, por ejemplo, adquiere velocidad como resultado de su energía potencial convertida en energía cinética … La primera ley de la termodinámica es simplemente una expresión del principio de conservación de la energía, y sostiene que la *energía* es una propiedad termodinámica. La segunda ley de la termodinámica afirma que la energía tiene *calidad*, así como *cantidad*, y los procesos reales ocurren hacia donde disminuye la calidad de la energía. (Cengel y Boles, 2014, p.3)

Figura 1.
Principios de la termodinámica



Nota. Tomado de *Termodinámica*, por Y. Cengel y M. Boles, 2014. McGraw Hill.

Consecuentemente, a nivel industrial, la termodinámica aplica sus principios al estudio de los procesos que desarrollan máquinas, instalaciones térmicas, la producción, el transporte, las transformaciones y el uso del calor. Su importancia en los sistemas de refrigeración o ciclo de refrigeración es primordial, puesto que se basa totalmente en la

termodinámica: está relacionado a la remoción del calor de un cuerpo (objeto o sustancia), transfiriéndolo para otro.

2.1.3. La energía aplicada a la industria

A lo largo de los años, siempre se ha tenido interés en hacer un mejor uso de la energía. Por esto, la energía estuvo siempre ligada a distintas invenciones, experimentaciones y desarrollo de productos que se usan hoy en día, tanto a nivel industrial como en los hogares para uso común. En la actualidad, es descriptiva de los fenómenos que tienen parte en lo que concierne al uso de la energía y especialmente en lo que hace referencia a los procesos relacionados con el calor. Aterrizando al concepto en el libro Termodinámica de Cengel y Boles (2014), la energía es la capacidad que tiene un sistema para producir un cambio en otro sistema, puede ser por medio de calor o de trabajo, también habla del análisis general de energía.

> La termodinámica se puede definir como la ciencia de la *energía*. Aunque todo el mundo tiene idea de lo que es la energía, es difícil definirla de forma precisa. La energía se puede considerar como la capacidad para causar cambios (Cengel y Boles, 2014, p.3).

Por lo que, a nivel del proyecto, la relación al concepto de energía se enfoca en que se busca aprovechar más el uso de la energía mediante la transferencia de calor en un sistema de enfriamiento líquido, ya que se analiza la capacidad que tiene un sistema, en este caso el de enfriamiento líquido, para producir un cambio en otro sistema, el del motor. Esto se da por medio del calor, realizando análisis generales de energía y se obtiene el resultado de evitar el sobrecalentamiento del motor de la articulación robótica.

2.1.4. Energía en forma de calor

Los autores Cengel y Boles (2014) definen el calor como una forma en la que la energía es transferida entre dos sistemas (o un sistema y sus alrededores) producto de una diferencia de temperatura.

> El calor se define como *la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas (o entre un sistema y el exterior) debido a una diferencia de temperatura*. Es decir, una interacción de energía será calor sólo si ocurre debido a una diferencia de temperatura. Entonces se deduce que no puede haber ninguna transferencia de calor entre dos sistemas que se hallan a la misma temperatura. (Cengel y Boles, 2014, p.60)

Este concepto ayuda a entender el tipo de energía que se está estudiando, por lo que se debe considerar las tasas de transferencia de calor que permitan la refrigeración deseada y eviten sobrecalentamientos que afecten al funcionamiento del brazo articulado.

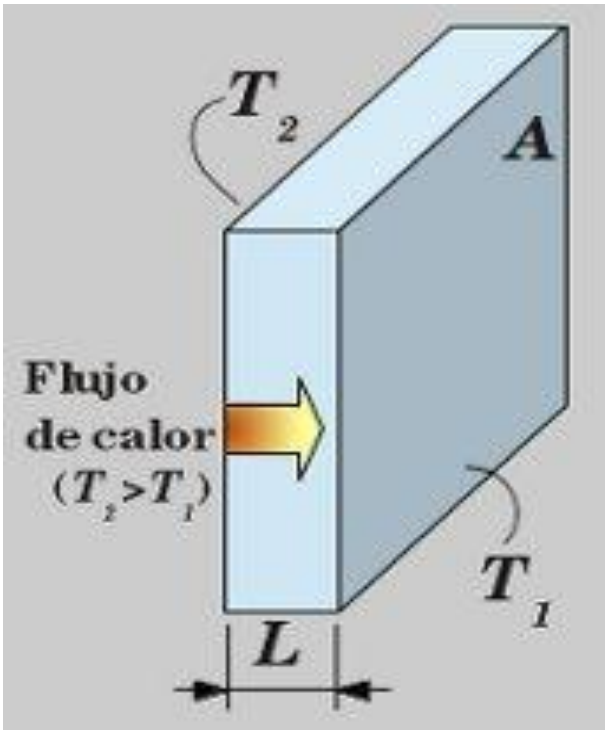
2.1.5. Mecanismos de transferencia de calor

Cengel y Boles (2014) también exponen que el calor es transferido a través de tres mecanismos: conducción, radiación y en esta investigación se centra en el tercero que es, específicamente, el de convección; es la interacción entre un sólido y líquido en movimiento, o entre líquidos en movimiento.

> El calor se transfiere mediante tres mecanismos: conducción, convección y radiación. La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia a las adyacentes menos energéticas, como resultado de la interacción entre partículas. La convección es la transferencia de energía entre una superficie sólida y el fluido adyacente que se encuentra en movimiento, y tiene que ver con los efectos

combinados de la conducción y el movimiento del fluido. La radiación es la transferencia de energía debida a la emisión de ondas electromagnéticas (o fotones). Al final de este capítulo se repasan los tres mecanismos de transferencia de calor como un tema de interés especial. (Cengel y Boles, 2014, p.62)

Figura 2.
Transferencia de calor hacia una superficie



Nota. Tomado de *Termodinámica*, por Y. Cengel y M. Boles, 2014. McGraw Hill.

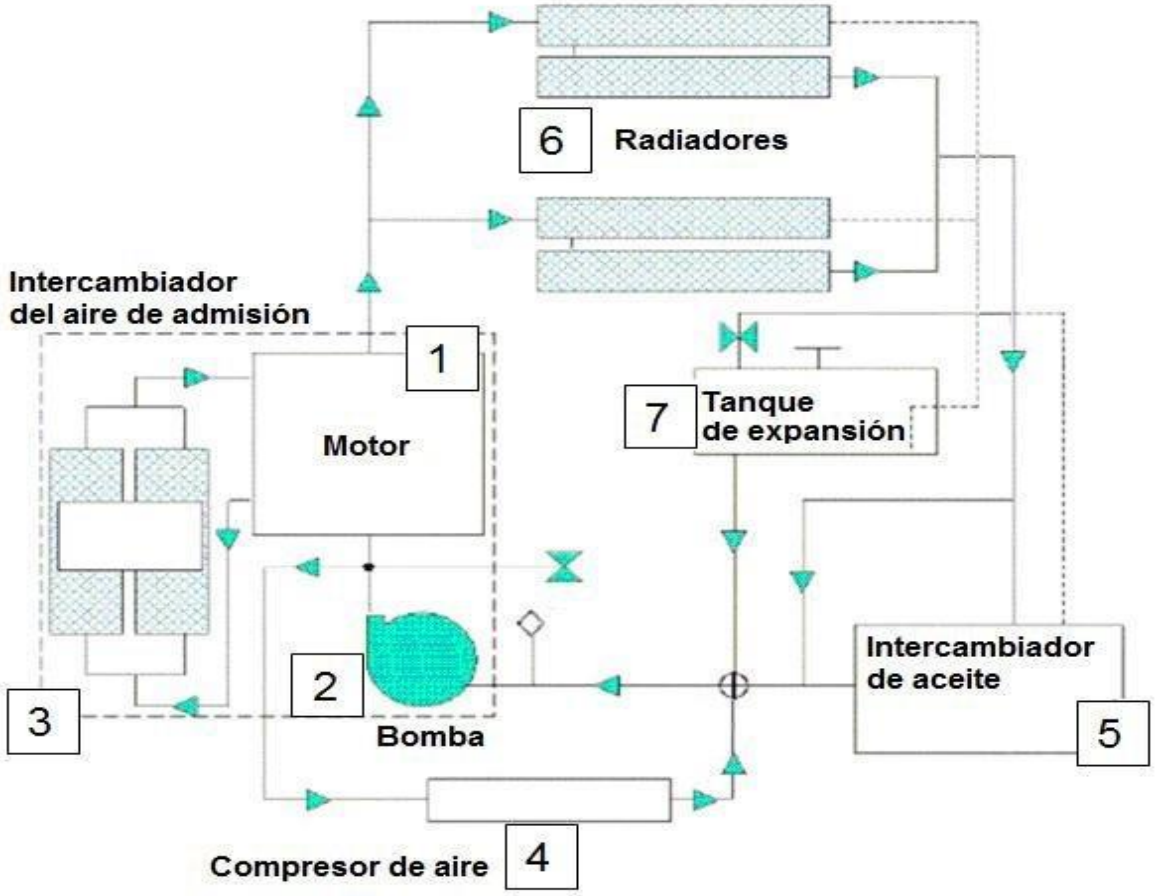
Por esta razón, la transferencia de calor ayuda a resolver las cuestiones planteadas en el problema, ya que saber cómo funcionan los mecanismos de transferencia de calor lo convierte en un determinante de cómo se comporta el proceso del diseño del sistema de enfriamiento. Por otra parte, a nivel industrial, estos procesos o mecanismos se ven prácticamente en todos los equipos y máquinas que participan en los procesos de producción industriales.

2.1.6. Sistemas de enfriamiento

Los sistemas de refrigeración o de enfriamiento son mecanismos basados en los principios de la termodinámica y mecánica de fluidos, que son diseñados para transferir energía térmica entre dos focos. Estos focos suelen ser sistemas termodinámicamente cerrados, sirven para evitar el sobrecalentamiento del motor y enfiarlo. Son indirectos, puesto que el líquido absorbe el exceso de calor generado en el motor, para luego transferir al aire. Según el libro Maquinaria y Mecanización Agrícola, explica que normalmente se utiliza el agua, ya que tiene una gran capacidad para absorber y transmitir calor, sin aumentar su temperatura significativamente y es fácil de conseguir, además, es menos dañino para el ambiente y de bajo costo.

> El líquido que normalmente se usa en este sistema es el agua debido a su gran capacidad para absorber y transmitir calor, sin eleva significativamente su temperatura, ya que tiene una capacidad calorífica seis veces mayor que la del aire. Además, es un líquido abundante, fácil de conseguir y de bajo costo. Este sistema de enfriamiento es llamados indirectos porque el agua absorbe el exceso de calor generado en el motor y luego lo transfiere al aire. (Chaves, 2004, p.84)

Figura 3.
Esquema de sistema de enfriamiento



Nota: Tomado de "Metodología para el análisis de un sistema de refrigeración rediseñado para un motor diesel", por Olmeda et al., 2008, *Scientia et technica*, *1*(38), p. 197 (https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4749094).

De modo que es importante conocer ¿qué se analiza y cómo funciona?, para lograr el análisis del sistema de enfriamiento líquido correcto y lograr el diseño que cumpla las necesidades planteadas en el problema, que es el desplazamiento de la energía térmica contenida en uno de sus focos (el motor del robot humanoide), a fin de obtener una menor temperatura en este. Además, un sistema de enfriamiento o de refrigeración busca que los equipos tengan una mejor eficiencia, calidad energética y ahorro de agua. También el sistema debe contar con una optimización y precisión de sus procesos que impliquen el adecuado

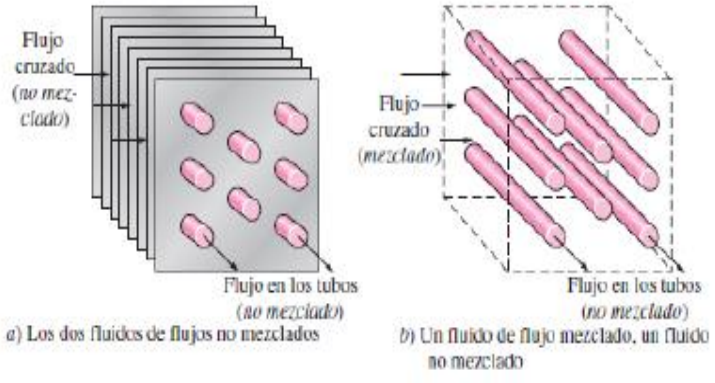
manejo de la temperatura, por lo que los fluidos utilizados para el enfriamiento de un proceso térmico deben ser lo óptimos con el objetivo de alcanzar o reducir temperaturas adecuadas para su fin.

2.1.7. Intercambiadores de calor

Estos son dispositivos que permiten el intercambio de calor entre dos fluidos que se presentan a diferentes temperaturas y al mismo tiempo impidiendo que se mezclen entre sí. Existen intercambiadores de menor área y volumen llamados compactos, estos logran elevadas razones de transferencia de calor entre dos fluidos a un volumen pequeño, la forma en trabaja se le llama fluido cruzado.

> … los intercambiadores de calor son dispositivos donde dos corrientes de fluido en movimiento intercambian calor sin mezclado. Los intercambiadores de calor se usan ampliamente en varias industrias y su diseño es variado. La forma más simple de un intercambiador de calor es un intercambiador de calor de tubo doble (conocido también como de tubo y coraza). (Cengel y Boles, 2014, p.242)

Figura 4.
Intercambiador de calor



Nota. Tomado de *Termodinámica,* por Y. Cengel y M. Boles, 2014. McGraw Hill.

El intercambiador de calor es parte vital del TFG y de un sistema de enfriamiento, por lo que se debe conocer cómo funcionan, diseño y tipos, para así lograr, con base en las necesidades de la articulación robótica a la cual está conectado, el intercambiador que mejor se adapte y cumpla con el objetivo de extraer la mayor cantidad de calor del fluido usado para enfriar los motores de la articulación.

2.1.8. La revolución de la robótica

Rossiter (2016) habla de que el siglo XIX estuvo marcado por la aceleración y la generalización de los procesos industriales, donde, a principios del siglo, se tiene que la Revolución industrial estaba a mitad de su desarrollo y esto produjo impacto en las vidas de los humanos, el cual fue enorme, sobre todo en la manufactura, los entornos de trabajo y la vida doméstica. En este siglo, el proceso se repitió con la Revolución tecnológica, pero a un ritmo mucho más veloz. Las tecnologías en los nuevos reinos de la electrónica, las telecomunicaciones, la automatización y la computación, en lugar de los sistemas mecánicos del siglo anterior y que hoy está en los inicios del cambio tecnológico conocido como la Revolución robótica. La cual, por su parte, explota una fusión entre los sistemas mecánicos, los sistemas eléctricos y los nuevos métodos de computación e inteligencia. Mediante la combinación de lo mejor de las múltiples tecnologías existentes y las nuevas, se está desarrollando y se desarrollará un abanico bastante asombroso de robots y sistemas robóticos.

> El siglo XIX estuvo marcado por la aceleración y la generalización de los procesos industriales. Al principio del siglo, la Revolución Industrial estaba a mitad de su desarrollo, mientras que en sus postrimerías habíamos desarrollado el coche y estábamos a punto de probar el vuelo con motor. El impacto en las vidas de los humanos fue enorme; se reescribieron las normas sociales y económicas que

> gobernaban el transporte, la sanidad, la manufactura, los entornos de trabajo y la vida doméstica. En el siglo XX, este proceso se repitió con la Revolución Tecnológica, pero a un ritmo mucho más veloz. La tecnología se desplazó del laboratorio y el instituto de investigación al hogar. El papel de motor impulsor recaía en los nuevos reinos de la electrónica, las telecomunicaciones, la automatización y la computación, en lugar de los sistemas mecánicos del siglo anterior. En los primeros años del siglo XX casi no había teléfonos, pero en los albores del nuevo milenio los móviles eran moneda común; cien años antes apenas se había oído hablar de computadoras, que ya han adquirido una presencia universal. Hoy estamos a las puertas de un nuevo cambio tecnológico de la misma relevancia: la Revolución Robótica. Esta revolución convertirá el siglo XIX en un momento crucial en la historia. Es más, tendrá un impacto irrevocable en nuestras vidas y en las vidas futuras (Rossiter, 2016, p.31-32).

En conclusión, Rossiter (2016) explica cómo se ha entrado a una nueva era, la de la robótica, además, explica el uso de robots y cómo estos pueden llegar a hacer realidad y revolucionar la industria en un futuro. Asimismo, se ha analizado el impacto hacia el futuro de la robótica con la interacción en los humanos y cómo han avanzado los desarrollos de productos de alta tecnología, como lo son la realidad virtual, inteligencia artificial, la industria 4.0, etcétera.

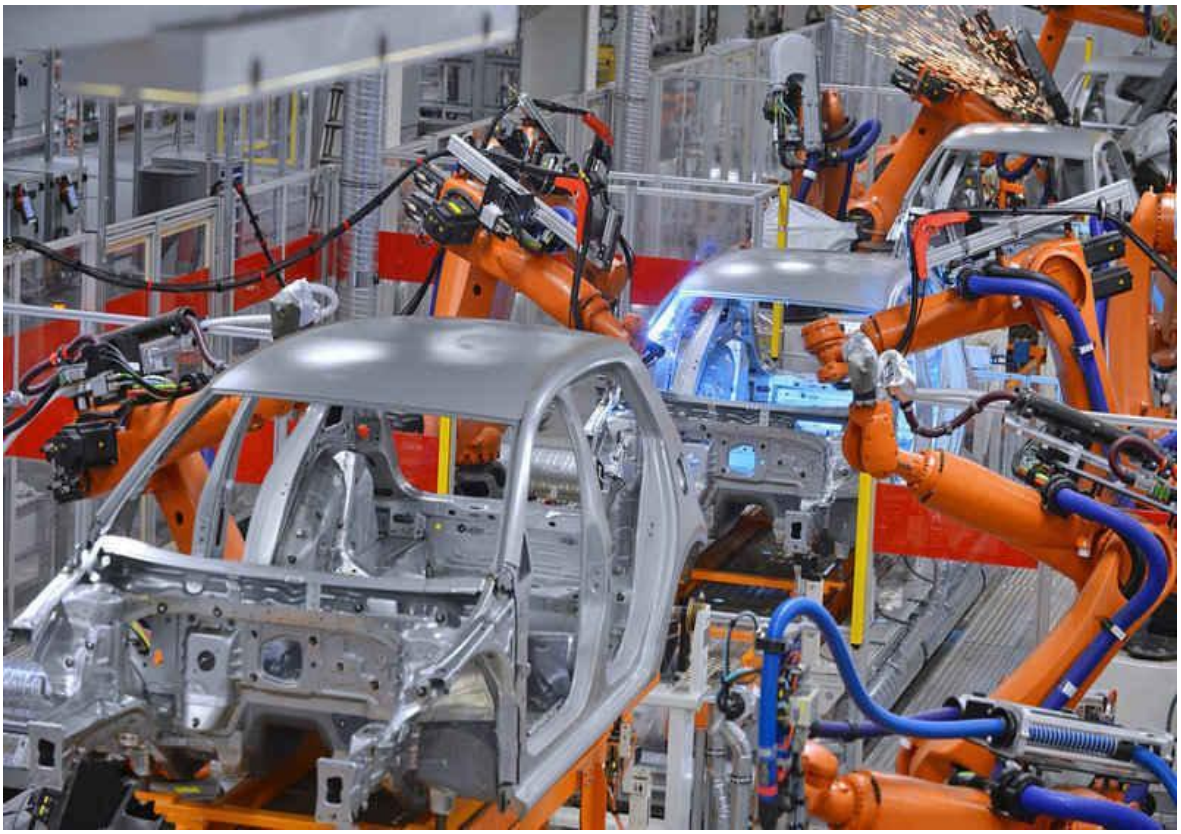
2.1.9. La robótica y automatización industrial

En la actualidad, se ha visto un gran desarrollo en el ambiente de la robótica, sobre todo en la robótica industrial que se define como el diseño, estudio y utilización de los robots, con el fin de ejecutar procesos industriales y la automatización industrial. Escaño et al. (2019) dicen que es el uso de sistemas o elementos computarizados y electromecánicos para fines

industriales, y que estas se enfilan a la creación de sistemas y mecanismos de producción automatizada con robots de escala industrial en las fábricas; hoy son tomados como una herramienta más dentro de las herramientas de producción. “La automatización industrial es una disciplina que incluye el conocimiento y la experiencia de varias ramas de la ingeniería, incluidas las ingenierías eléctrica, electrónica, química, mecánica y de comunicaciones, además de buenos conocimientos de ingeniería informática y software” (Escaño et al., 2019, p.1).

Ciertamente, este proyecto de investigación no está del todo ligado con lo que es la automatización industrial, pero busca que el resultado del diseño del sistema de enfriamiento líquido también sea adaptable y se aplique en sistemas robóticos industriales, ya que con los últimos avances es muy probable que los robots se vuelvan mucho más autónomos y cuenten con sistemas operativos más avanzados. Esto ayudaría al aumento de la eficiencia en lo que es el control térmico y evitar el sobrecalentamiento de los robots, generando así que estos trabajen mejor y sin problemas, evitando costos de mantenimiento y de compra de nuevo equipo. Ya que gracias a la robótica industrial las fábricas han encontrado nuevas formas de producir mediante la automatización de varios procesos.

Figura 5.
Sistema automatizado para la fabricación de automóviles.



Nota: Tomado de *Nueva base de datos ayuda a crear aleaciones de acero innovadoras*, por M. Lessard, 2019, Thermofisher (https://www.thermofisher.com/blog/cienciaacelerada/metales/nueva-base-de-datos-ayuda-a-crear-aleaciones-de-acero-innovadoras/).

2.1.10. Robots humanoides y articulaciones robóticas

Los robots humanoides son básicamente un sistema robotizado desarrollado para imitar el movimiento y ciertas características humanas. Estas máquinas artificiales están, en su mayoría, diseñadas para trabajar en entornos orientados a los humanos y que trabajan de forma autónoma. La mayoría están diseñados para que sean capaces de ayudar en actividades cotidianas de las personas.

Definimos qué es un robot humanoide como un sistema robotizado desarrollado para simular la silueta y la forma de moverse de los humanos. Son máquinas artificiales

> que se identifican por su capacidad de interacción con las personas. Su avance en la última década se debe al progreso de la tecnología que emplean, como es la Inteligencia Artificial, la robótica y la mecatrónica. (Revista de Robots, 2020, párr.1)

Ahora bien, en la última década, se sabe que la industria viene cambiando, por lo que la llamada cuarta revolución permite la digitalización de las fábricas y que estas puedan pasar de la producción en masa a la personalización en masa, lo cual facilitará la reindustrialización, además, con nivel de sofisticación de estas máquinas se está incrementando; ofrecen más horas de trabajo a menor coste. Un ejemplo como menciona Galindo (2015) es el del grupo ABB que ha desarrollado YuMi, un robot de última generación capaz de manejar piezas delicadas. YuMi y sus compañeros de trabajo humanos pueden trabajar codo con codo sin tener que recurrir a vallas o jaulas protectoras.

> En este nuevo universo, probable fuente de inspiración para un escritor de ciencia ficción, los robots son esenciales. El nivel de sofisticación de estas máquinas se está incrementando; ofrecen más horas de trabajo a menor coste, aunque también es verdad que exigen mayores inversiones iniciales. El Internet de las cosas (en la actualidad, hoy hay 3.800 millones de objetos conectados a la red de forma autónoma y, según la consultora tecnológica Gartner, la cifra crecerá hasta 25.000 millones en 2020), el universo big data (análisis de grandes cantidades de datos para anticipar comportamientos o averías) y la nube (almacenamiento digital a gran escala) completan la nueva Industria 4.0, según el término acuñado en Alemania. Otro elemento importante son los nuevos materiales, más ligeros, como la fibra de carbono, que están sustituyendo al aluminio y el acero. (Galindo, 2015, párr.3)

También es común observar en plantas y fábricas el uso de brazos robóticos, que son dispositivos programables, cuyas principales funciones y comportamiento corresponden a los del brazo de un individuo. Ayudan a la automatización de los procesos y su forma consiste en distintos componentes que forman el autómata; están unidos y conectados entre sí para que realice movimientos. En la parte superior del brazo, como extensión, se encuentra la mano robótica, que puede estar en forma de pinza, ventosa o garra, dependiendo del desempeño que deba realizar. Estos suelen ser, entre otros, sujetar, mover productos, elegir o ensamblar componentes.

> Un brazo robótico es un dispositivo programable cuyas funciones principales y comportamiento se asemejan a las de un brazo humano. Las diferentes partes que conforman el robot se unen y conectan entre sí para que este efectúe movimientos de rotación y de translación. Al final del brazo, como extensión, se ubica la mano robótica, que puede tener forma de pinza, de ventosa o de garra, según la función que deba desempeñar. Estas pueden ser, entre otras, de sujeción, desplazamiento de mercancías, picking o ensamblaje de piezas. (MECALUX, 2021, párr.5)

Todo lo mencionado anteriormente forma parte de conocer el campo en el cual se está desarrollando el sistema de refrigeración que busca sea adaptable y se aplique en sistemas robóticos industriales, para que los sistemas operativos sean mucho más avanzados. Esto ayudaría al aumento de la eficiencia en lo que es el control térmico y evitar el sobrecalentamiento de los robots, generando así que estos trabajen mejor y sin problemas, además, evitando costos de mantenimiento y compra de nuevo equipo.

2.1.11. La innovación industrial

Salazar et al. (2014) hacen hincapié en los avances y desafíos que representa la innovación industrial en América Latina. Según Bell y Pavitt (1993, citados por Salazar et al., 2014), en los países emergentes, la imitación y la adquisición de tecnologías son más importantes que la I+D y la innovación como condiciones previas para aprender y actualizarse.

> La innovación industrial es una de las bases de las ventajas competitivas sostenibles de las organizaciones. Se ha aprendido a lo largo de décadas que el gasto en Investigación y Desarrollo (I+D), innovación, productividad e ingreso per cápita influyen en el crecimiento sostenido a largo plazo. (Rouvinen, 2002, citado por Salazar et al., 2014, p.149)

Por lo que la innovación industrial, según este artículo, muestra cómo, para países de América Latina, es un desafío muy grande la adquisición de tecnologías, así como la imitación; representan puntos clave para ponerse al día con el resto del mundo. Es una realidad que la innovación es una gran ventaja para el desarrollo de un país, mejorando la productividad y, por ende, los ingresos que este genere a lo largo del tiempo. Esto permite conocer la importancia de impulsar la innovación, permitiendo saber que es factible tomar y fijar la meta de la innovación en ámbitos de tecnología para el crecimiento industrial de Costa Rica.

2.1.12. Gestión de la innovación tecnológica

Por lo que, el hecho de preguntarse: "¿Qué producir?" puede conllevar la transformación de los sistemas productivos globales. La lógica de producción sugiere, de esta manera, una dinámica progresiva de cambio y novedad constantes (Orozco et al., 2015, p.1).

> La gestión de la innovación tecnológica se puede entender como la organización y dirección de los recursos, tanto humanos como económicos, con el fin de aumentar la creación de nuevos conocimientos, la generación de ideas técnicas que permitan obtener nuevos productos, procesos y servicios o mejorar los ya existentes, el desarrollo de dichas ideas en prototipos de trabajo, y la transferencia de esas mismas ideas a las fases de fabricación, distribución y uso, respondiendo a las necesidades del cliente y del mercado (Roberts, 1996, p.426).

Siempre que se quiere introducir un nuevo producto o servicio se hace con el objetivo de responder a las necesidades del cliente o del mercado cuando se busca innovar, abarcando desde la creación de ideas técnicas hasta la mejora de los productos ya existentes para obtener un resultado óptimo. El propósito de la generación de nuevas ideas/ alternativas en cuanto al brazo robótico articulado es mejorar las condiciones actuales de ciertas deficiencias, permitiendo aumentar y maximizar su utilidad.

2.2. Marco contextual

La UTN es la quinta universidad pública de Costa Rica, ubicada en el cantón central de Alajuela. Fue creada el 4 de junio de 2008, con el fin de dar atención a las necesidades de formación científica, técnica y tecnológica que requiere el país, en los niveles de educación superior universitaria (UTN, s.f.a).

Figura 6.
Universidad Técnica Nacional.

Nota. Tomada de *Reseña histórica de la universidad técnica nacional*, por Universidad Técnica Nacional (https://www.utn.ac.cr/content/rese%C3%B1a-hist%C3%B3rica-de-la-universidad-t%C3%A9cnica-nacional).

La visión y misión de la UTN se definen de la siguiente manera:

Visión. Ser una universidad de vanguardia en la formación integral de profesionales, la investigación y la extensión en las áreas técnicas y tecnológicas, con un enfoque de humanismo científico innovador, que contribuya al desarrollo sostenible de la sociedad costarricense.

Misión. Brindar una educación de excelencia, integral e inclusiva, en el marco de la moderna sociedad del conocimiento, centrando nuestra acción académica en el área científica, técnica y tecnológica, con una investigación aplicada e innovadora como elemento fundamental para el desarrollo humano en articulación con los sectores productivos de la sociedad. (UTN, s.f.b, párr. 2-3)

Según la Ley Orgánica de la Universidad Técnica Nacional (Ley 8638) de la Asamblea Legislativa de Costa Rica (2008), la UTN lleva consigo los siguientes fines:

> a. Crear, conservar y trasmitir la cultura nacional y universal, en el marco de un esfuerzo integral y sostenido, orientado al mejoramiento integral de la sociedad costarricense, el fortalecimiento de su democracia y la creación de condiciones económicas y sociales más equitativas y justas para la convivencia social, especialmente el fomento de actividades productivas y la generación de empleo.
>
> b. Ofrecer una educación integral que les garantice paralelamente su óptima formación profesional y técnica, así como su desarrollo integral, moral, cultural y personal.
>
> c. Promover la investigación científica de alto nivel técnico y académico, para contribuir en los procesos de desarrollo, modernización y mejoramiento técnico de los sectores productivos, las empresas exportadoras y, especialmente, las pequeñas y medianas empresas.
>
> d. Preparar profesionales de nivel superior, en carreras universitarias con conformidad en los requerimientos científicos y tecnológicos del desarrollo mundial y del país, que culminen con la obtención de títulos y grados universitarios, dando énfasis especial a las carreras técnicas que demanda el desarrollo nacional.
>
> e. Desarrollar tantas carreras cortas en el nivel de pregrado universitario, que acrediten para el desempeño profesional satisfactorio y la inserción laboral adecuada.
>
> f. Desarrollar programas especiales de fortalecimiento de las pequeñas y medianas empresas, mediante acciones de asistencia técnica, capacitación y formación integral, para procurar su desarrollo y expansión. (art. 5)

La UTN maneja cuatro líneas de trabajo: Vida estudiantil, Docencia, Extensión y acción social e Investigación y transferencia. Esta última se encarga de emitir las políticas, procedimientos, directrices y todo tipo de normativa respecto del área (UTN, s.f.d). Además, impulsa y promueve programas, proyectos y actividades para fortalecer la investigación. Ha orientado un modelo de investigación que favorece la innovación, la transferencia y el tipo de investigación aplicada, por ello cuenta con áreas estratégicas para enfatizar en tópicos de interés para la institución y para el país. Además, se enfoca desde una nueva perspectiva, y se impulsa como uno de los pilares fundamentales de esta institución. Tratando de hacer énfasis en el lema «todos somos aprendientes». La investigación se muestra como uno de los caminos a seguir para aprender, transferir y mejorar las condiciones de los sectores productivos y de la sociedad costarricense en general. La UTN (s.f.c) indica lo siguiente sobre su modelo educativo:

> … plantea estrategias y prácticas pedagógicas centradas en el aprendizaje, así como una gestión de formación holística en la que las habilidades sociales se complementan con las habilidades y conocimientos específicos del área de trabajo. Desde esta visión holística, las prácticas educativas en la UTN deben encontrar su origen en el pensamiento crítico y creativo, en el desarrollo de líderes participativos comprometidos con la sociedad, cuya formación es contextualizada a partir de estudios interdisciplinares, de experiencias transdisciplinares y de proyectos que faciliten la comprensión, la reflexión y las respuestas innovadoras. (párr. 3)

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

En el marco metodológico se tiene como propósito permitir, descubrir y analizar los supuestos del estudio y de reconstruir los datos, a partir de los conceptos teóricos habitualmente operacionalizados. Además, se presentan las herramientas para llevar a cabo el experimento que consiste en estudiar y analizar el sistema refrigerante que mejor cubra las necesidades del diseño para el brazo robótico, mediante la medición y evaluación de los posibles modelos, en él se encuentra el enfoque, el tipo de estudio, el alcance temporal, la finalidad, así como la muestra determinada a estudiar para la realización de este TFG.

3.1. Enfoque

El enfoque seleccionado para la investigación corresponde al mixto, permitiendo un estudio más completo al combinar la parte cualitativa con la cuantitativa, brindando una multiplicidad más amplia de datos que permite potenciar la creatividad retórica y ampliar las dimensiones de la investigación. Hernández et al. (2014) indican lo siguiente sobre el enfoque mixto:

> Es un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación e implica la recolección y análisis de datos cuantitativos y cualitativo, así como su integración y discusión conjunta, para realizar inferencias producto de toda la información recabada y lograr mayor entendimiento del fenómeno bajo información. (p. 256)

Desde este enfoque, mediante la recopilación de información por parte de expertos en la materia de la robótica, la ciencia y la ingeniería, de la mano con el análisis cuantitativo de las correspondientes mediciones de diferentes aspectos relevantes mediante simulaciones del estudio como lo son los tipos de sistemas de enfriamiento, líquidos refrigerantes,

materiales, su comportamiento, entre otros, permiten en conjunto un mejor entendimiento de los resultados obtenidos.

3.2. Tipo de estudio o profundidad

El tipo de estudio seleccionado es el descriptivo, este permite describir fenómenos específicos. Hernández et al. (2014) indican que: “Los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis” (p.80).

Es gracias a este tipo de estudio que permite detallar los fenómenos y procesos de interés como lo es el caso del análisis de sistemas de enfriamiento y mecanismos que se adapten al sistema robótico articulado. Por consiguiente, permite la obtención de detalles específicos de las propiedades y características de los diferentes sistemas de enfriamiento, detallando la situación real de estos en la actualidad, siendo esta la base justificativa de elección de este tipo de estudio.

3.3. Alcance temporal

Según Tamayo (2003), el estudio se circunscribe a un momento puntual, un segmento de tiempo durante el año, a fin de caracterizar la situación en ese tiempo específico. De esta manera, la investigación se desarrolla de manera sincrónica, ya que se busca recopilar, estudiar y analizar información en un contexto y temporalidad específica con respecto al brazo robótico articulado. Se desarrolla aproximadamente en los meses de agosto a noviembre del año 2020 y de enero a abril del año 2022.

3.4. Finalidad

La investigación que mejor describe el proyecto es la pura con matices aplicados, según la Universidad de la República de Uruguay (2020), un gran número de estudios participa de la naturaleza de la investigación básica y aplicada, puesto que toda investigación involucra problemas teóricos y prácticos.

En este proyecto, se requiere una investigación básica o pura primero, para posteriormente aplicar los conocimientos a la práctica mediante simuladores y después analizar los datos numéricos obtenidos.

3.5. Fuente

De acuerdo con Cerda (1993), en cuanto el nivel de información que proporcionan las fuentes de información, usualmente se habla de dos tipos de fuentes y pueden ser primarias o secundarias. Por ejemplo, las fuentes primarias contienen información directa, en el caso de este TFG, la fuente para el análisis cualitativo serán entrevistas directamente a las personas que tienen relación directa con la situación objeto del estudio y para la parte numérica, los datos se obtendrán de las mediciones hechas con los simuladores. Para las fuentes secundarias que contienen información sobre el tema que se va a investigar, pero que no son la fuente original de los hechos o las situaciones, sino que solo los referencian; en esta tesis será de revistas científicas con relación al tema y documentos oficiales de instituciones públicas como informes técnicos y de investigación.

3.6. Muestra: muestra no probabilística y análisis de datos numéricos

Al contar con un enfoque cualitativo, se ha determinado con el fin de enriquecer esta investigación, la recopilación de datos de manera no probabilística. Para ello se realiza mediante la elección de muestra no probabilística, a través del método de selección brindado

por expertos en el tema, así como lo mencionan Hernández et al., (2014): “En las muestras no probabilísticas, la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o de quien hace la muestra” (p.176). A continuación, se indican los criterios de selección de participantes del proceso investigativo.

Tabla 2.
Características de selección de la población

Población	Años de Experiencia	Especialidad	Cantidad	Área
Experto en análisis de datos	Más de 3 años en trabajo de análisis de datos	Industrial/Producción Industrial	1	Ingeniería y Estadística
Experto en sistemas de refrigerantes	Más de 3 años en investigación o trabajo con sistemas de refrigerantes	Mecánica/Química/Electromecánica/Diseño Industrial	2	Ingeniería
Experto en robótica	Más de 3 años en investigación o trabajo en el área de robótica	Mecánica/Electromecánica/Robótica	2	Ingeniería/Investigación

Los criterios de selección se basan en la necesidad de trabajar con profesionales pertenecientes a: 1-Las áreas de estudio de interés, debido a su conocimiento y experiencia, 2-En profundizar información de primera mano de parte de profesionales de la industria y 3-Explorar nuevos mecanismos que se utilizan en la robótica actual.

Por otra parte, se realiza un análisis de datos numéricos obtenidos mediante simuladores de sistemas de enfriamiento y su funcionamiento en el brazo robótico articulado mediante la recolección y análisis de los resultados con un diseño estadístico de experimentos para cada variable; primero hay que describir los datos, los valores o las puntuaciones obtenidas para cada variable.

3.7. Técnicas

3.7.1. Entrevista a profundidad

Las entrevistas a profundidad son un método de recolección de datos cualitativos que recopila una gran cantidad de información. Durante las entrevistas a profundidad, se exploran puntos adicionales y cambia el rumbo del proceso cuando sea necesario, ya que es un método de investigación independiente que puede adoptar múltiples disciplinas según las necesidades de la investigación.

Se emplea con el fin de obtener información de mano de expertos en análisis de datos, robótica, sistemas de refrigerantes y así desarrollar nuevos conocimientos; evaluar diferentes soluciones a los problemas planteados, logrando gestionar el proceso de investigación, mientras ayudan en el análisis de datos, también para tener profundidad de las experiencias, sentimientos y perspectivas de los entrevistados.

3.7.2. Análisis FORD

El análisis FORD (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades, Riesgos) es conocido por ser un instrumento de estudio de la situación de una empresa, institución, proyecto o persona, analizando sus características internas, las cuales son debilidades y fortalezas y las externas riesgos y oportunidades en una matriz cuadrada.

> La matriz de análisis DAFO o FODA (FORD), es una conocida herramienta estratégica de análisis de la situación de la empresa. El principal objetivo de aplicar la matriz DAFO en una organización, es ofrecer un claro diagnóstico para poder tomar las decisiones estratégicas oportunas y mejorar en el futuro. Su nombre deriva del

> acrónimo formado por las iniciales de los términos: debilidades, amenazas (riesgos), fortalezas y oportunidades. (Espinosa, 2018, párr. 1)

Tiene como objetivo realizar una catarsis del funcionamiento, diseño, problemas y limitaciones, en los diferentes métodos usados en sistemas de refrigeración adaptados a articulaciones robóticas, con el fin de determinar las ventajas competitivas bajo análisis y la estrategia genérica que más convenga en función de las características propias y de las que se adapte a las necesidades planteadas en el problema.

3.7.3. Diseño CAD

El diseño CAD, que por sus siglas en inglés significa diseño asistido por computadora, es una técnica de análisis, una manera de crear un modelo del comportamiento de un producto antes de que se haya construido. Los dibujos en papel pueden no ser necesarios en la fase del diseño. “El avance de la ingeniería se viene dando fundamentalmente por los nuevos y/o mejora de materiales, equipos y herramientas de trabajo, descubrimiento y aplicación de nuevos conceptos. Estos avances han sido favorecidos por el desarrollo de las tecnologías CAD” (Rojas y Rojas, 2006. P. 8).

Por este motivo, el diseño en CAD ha sido una herramienta revolucionaria que permite crear un modelado del producto de interés para corroborar su correcto funcionamiento, gracias a una simulación del prototipo sin tenerlo físicamente, permitiendo emular materiales, diseños, formas etc., siendo esta una de sus principales ventajas. En cuanto a esta tesis de graduación, el diseño asistido por computadora permite diseñar el intercambiador de calor para ser sometido a estudio y análisis, tomando en cuenta otras partes del que esté ensamblado como la articulación, tubos cobre, cables, bomba y soporte mecánico, para determinar que se adapte a la articulación robótica hueca.

3.7.4. Simulación fluidodinámica computacional

La fluidodinámica computacional consiste en el análisis de sistemas relacionados con el flujo de fluidos, transferencia de calor y otros fenómenos asociados por medio de la simulación por computador. “La fluidodinámica computacional (del inglés CFD-Computational Fluid Dynamics) consiste en el análisis de sistemas relacionados con el flujo de fluidos, transferencia de calor y otros fenómenos asociados (como reacciones químicas) por medio de la simulación por computador” (AST Ingeniería, 2020, párr. 1).

Esta técnica se usa con el fin de analizar el comportamiento térmico del prototipo y la interacción del fluido en el mismo mediante la simulación. Permite observar si la extracción del calor se da de forma adecuada, si el flujo es correcto y si se evita el sobrecalentamiento del intercambiador.

3.7.5. Diagrama de flujo de procesos

Un diagrama de flujo es la representación gráfica de flujo de un proceso o de una secuencia de actividades rutinarias. Utiliza diversos símbolos para representar las operaciones o actividades específicas del proceso. Se llaman así porque las actividades representadas por símbolos se conectan por medio de flechas para indicar la secuencia de la operación. “Se define como diagrama de proceso a una representación gráfica relativa a un proceso industrial o administrativo” (Niebel, 1996, citado por Rives, 2011, p. 25).

Esta técnica se usa con el fin de graficar todo el proceso que conlleva el diseño del sistema de enfriamiento líquido para la articulación robótica hueca, pues permite documentar de manera sencilla y entendible.

3.7.6. Diseño estadístico de experimentos

El diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. Esta metodología se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permiten entender mejor, situaciones complejas de relación causa-efecto.

> El diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. Esta metodología se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permiten entender mejor, situaciones complejas de relación causa-efecto. (Gutiérrez y De la Vara, 2008, pp. 6-7)

En este trabajo final de graduación, se usa para el análisis de los datos experimentales de intercambio de temperatura, estudiando así el comportamiento de los resultados obtenidos, lo que permite dar un razonamiento lógico acerca de qué factores influyen más en los resultados y cómo se debe reconfigurar la actividad que se estaba realizando para alcanzar los objetivos marcados. Dentro de los diseños estadísticos de experimentos, se utilizan otras herramientas gráficas para el estudio de los datos.

3.7.7. Interfaz gráfica programada de computadora

La interfaz gráfica es un programa informático que actúa de interfaz de usuario, utilizando un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles en la interfaz. Su principal uso consiste en proporcionar un entorno

visual sencillo para permitir la comunicación con el sistema operativo de una máquina o computador.

Se utiliza para obtener un banco de pruebas experimental, empleando un sistema de control de recolección de datos del tanque de aceite y el sistema de bombeo, con el fin de compararlos con los datos del simulador.

3.7.8. Análisis costo-beneficio

Parte importante para la toma de decisiones en una investigación y desarrollo de un producto es conocer la rentabilidad de este, por lo que el análisis costo-beneficio es una herramienta financiera que mide la relación que existe entre los costos y beneficios asociados a un proyecto de inversión, como ya se dijo, a la creación de un nuevo producto o empresa, con el fin de conocer su rentabilidad.

> El análisis coste-beneficio (ACB) es una metodología para evaluar de forma exhaustiva los costes y beneficios de un proyecto (programa, intervención o medida de política), con el objetivo de determinar si el proyecto es deseable desde el punto de vista del bienestar social y, si lo es, en qué medida. Para ello, los costes y beneficios deben ser cuantificados, y expresados en unidades monetarias, con el fin de poder calcular los beneficios netos del proyecto para la sociedad en su conjunto. Esta metodología muestra además quién gana y quién pierde (y por cuánto) como resultado de la ejecución del proyecto. El ACB se utiliza en la evaluación ex ante como una herramienta para la selección de proyectos alternativos o para decidir si la implementación de un proyecto concreto es socialmente deseable. También puede ser empleado ex post para cuantificar el valor social neto de un proyecto previamente ejecutado. (Ortega, 2012, p. 1)

Por lo que, para este TFG, permitirá medir principalmente la relación costo-beneficio, la cual se calcula al dividir el valor actual del beneficio neto, entre el valor actual de los costos de inversión o costos totales del sistema de enfriamiento, y con esto definir si el producto será rentable o no.

3.8. Matriz de validez

Tabla 3.
Matriz de operacionalización

Enfoque	**Tipo estudio**	**Población-Sujetos de estudio o unidad de análisis**
Mixto	Descriptivo	Sistemas de enfriamiento

Interrogante Problema	**Objetivo general**	**Objetivos específicos**	**Categorías de análisis o variable**	**Definiciones Conceptual**	**Subcategorías**	**Descripción de Técnicas**	**Descripción de Instrumentos**
¿Cómo aumentar la extracción de calor en una articulación robótica hueca, al realizar tareas de alta demanda energética en un ambiente simulado, en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional durante el periodo 2021?	Analizar un sistema de enfriamiento líquido para articulaciones robóticas, con el fin de que aumente la extracción de calor al realizar tareas de alta demanda energética mediante un estudio dinámico de fluidos en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional durante el periodo 2021.	Definir los métodos actuales más relevantes de la refrigeración térmica en motores, máquinas eléctricas y robots humanoides, mediante un estudio comparativo de diseños, funcionamiento, problemas y limitaciones en sistemas de refrigeración térmica existentes a nivel nacional e internacional, con el fin de conocer las pautas que más se adapten al diseño que se desea.	Sistemas de enfriamiento	Sistemas de enfriamiento: “Este sistema de enfriamiento es llamados indirectos porque el agua absorbe el exceso de calor generado en el motor y luego lo transfiere al aire” (Chaves, 2004, p.84).	Funcionamiento de sistemas de enfriamiento existentes y diseño de sistemas de enfriamientos actuales.	Análisis FORD Entrevista	Guía FORD Guía de Entrevista a profundidad

Interrogante Problema	Objetivo general	Objetivos específicos	Categorías de análisis o variable	Definiciones Conceptual	Subcategorías	Descripción de Técnicas	Descripción de Instrumentos
		Realizar un diseño en 3D de un intercambiador de calor del sistema de enfriamiento para articulaciones robóticas humanoides, mediante el diseño asistido por computadora, con el criterio de modificación de la pieza para la optimización de la masa e intercambio de calor, con el fin de obtener un prototipo que se ajuste a las necesidades descritas en el planteamiento de problema.	Diseño CAD de un intercambiador de calor del sistema de enfriamiento.	Intercambiador de calor: "En los sistemas mecánicos, químicos, nucleares y otros, ocurre que el calor debe ser transferido de un lugar a otro, o bien, de un fluido a otro. Los intercambiadores de calor son los dispositivos que permiten realizar dicha tarea… un intercambiador de calor es un componente que permite la transferencia de calor de un fluido (líquido o gas) a otro fluido… un intercambiador de calor es un componente que permite la transferencia de calor de un fluido (líquido o gas) a otro fluido". (Jaramillo, 2007, p. 2).	Articulación robótica, Radiador o Intercambiador de calor, Bomba para el líquido, Sistema de enfriamiento, proceso de diseño y fabricado del sistema de enfriamiento.	Diseño asistido por computadora Diagrama de Flujo de procesos	*Software* de diseño, simulación, mecanizado CAD Guía diagrama de flujo de procesos

Interrogante Problema	Objetivo general	Objetivos específicos	Categorías de análisis o variable	Definiciones Conceptual	Subcategorías	Descripción de Técnicas	Descripción de Instrumentos
		Demostrar el comportamiento térmico del prototipo de forma experimental, mediante un simulador dinámico de fluido y junto con un diseño de estadístico experimentos para el análisis de los datos obtenidos de la simulación, con la finalidad de conocer si el prototipo cumple con las especificaciones requeridas.	Demostración del funcionamiento del prototipo mediante la simulación dinámica de fluido.	Comportamiento térmico: "La primera ley de la termodinámica es simplemente una expresión del principio de conservación de la energía, y sostiene que la *energía* es una propiedad termodinámica. La segunda ley de la termodinámica afirma que la energía tiene *calidad*, así como *cantidad*, y los procesos reales ocurren hacia donde disminuye la calidad de la energía. (Cengel y. Boles, 2014, p.3). Comportamiento de fluidos: "La mecánica de fluidos es el estudio del comportamiento de los fluidos, ya sea que estén en	Aumento de la extracción del calor, Comportamiento del flujo del líquido, Disminución considerable del sobrecalentamiento del intercambiador.	Simulación dinámica de fluido computacional	*Software* Simulación dinámica de fluido computacional

Interrogante Problema	Objetivo general	Objetivos específicos	Categorías de análisis o variable	Definiciones Conceptual	Subcategorías	Descripción de Técnicas	Descripción de Instrumentos
				reposo (estática de fluidos) o en movimiento (dinámica de fluidos). (…) Es importante aprender a analizar el comportamiento de los fluidos cuando fluyen a través de tuberías circulares y por conductos de otras formas. (…) Se considerará la energía del fluido según su velocidad, elevación y presión" (Mott, 2006, p.1).			
			Análisis de los datos experimentales de: Intercambio de temperatura, mediante con un diseño de estadístico de experimentos.	Diseño de estadístico de experimentos: "El diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por	Análisis ANOVA con los datos de las simulaciones Banco de datos de pruebas experimentales.	Diseño de estadístico de experimentos mediante *software* estadístico Interfaz gráfica programada de computadora	*Software* de diseño de estadístico de experimentos. Sistema de control de recolección de datos, tanque de aceite y el sistema de bombeo.

Interrogante Problema	Objetivo general	Objetivos específicos	Categorías de análisis o variable	Definiciones Conceptual	Subcategorías	Descripción de Técnicas	Descripción de Instrumentos
				medio de pruebas planeadas adecuadamente. Esta metodología se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permiten entender mejor, situaciones complejas de relación causa-efecto" (Gutiérrez y De la Vara, 2008. pp.6-7).			
			Análisis económico del sistema de enfriamiento según el prototipo final.	"El análisis coste-beneficio (ACB) es una metodología para evaluar de forma exhaustiva los costes y beneficios de un proyecto (programa, intervención o medida de política), con el objetivo de	Evaluación económica del sistema de enfriamiento	Análisis costo-benéfico	Guía análisis costo-benéfico

Interrogante Problema	Objetivo general	Objetivos específicos	Categorías de análisis o variable	Definiciones Conceptual	Subcategorías	Descripción de Técnicas	Descripción de Instrumentos
				determinar si el proyecto es deseable desde el punto de vista del bienestar social y, si lo es, en qué medida". (Ortega, 2012, p. 1)			

CAPÍTULO IV. PRESENTACIÓN, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Esta parte del capítulo aborda la presentación, interpretación y discusión de los resultados del presente trabajo final de graduación, del tema análisis de un sistema de enfriamiento líquido para articulaciones robóticas mediante un estudio dinámico computarizado en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional, durante el periodo 2020-2022.

Primeramente, se presentan los resultados según las categorías de análisis, ya que cada una de estas representa parte del proceso investigativo en el que se va explicando y respondiendo el problema planteado previamente. Después, cada una de estas categorías se divide en varias subcategorías, las cuales son los atributos o las características de las categorías que representan la información detallada de la que se investiga, aplicando las técnicas e instrumentos previamente establecidos. Seguidamente, se validan, interpretan y discuten estos resultados con respecto al marco teórico.

En este análisis, se expone la problemática existente en los diferentes sistemas de enfriamiento líquido, ya que sus estructuras son muy complejas y generan más peso a las articulaciones robóticas; esto hace que los motores se sobrecalientan, además de que dichos sistemas son muy diferentes y no se adaptan a la articulación robótica que se desarrolla en la universidad. Por lo que, gracias a la investigación y estudio de sistemas ya existentes, realizado en el trabajo de campo, se fijan estrategias para la realización de las propuestas de diseño del intercambiador de calor apto y funcional para el sistema de enfriamiento de la articulación robótica que se encuentra en desarrollo en el Laboratorio de Robótica de la UTN. El mismo sistema de enfriamiento no genera más peso ni entorpece el movimiento de la articulación. Finalmente, con el análisis estadístico que se les realiza a los datos extraídos de la simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) y la simulación física a tiempo real, se plantea cuál diseño es el favorable.

Los datos se recolectaron a través de diferentes instrumentos y técnicas: la primera es la entrevista a profundidad, realizada a seis expertos de diferentes áreas como la ingeniería, mecánica, robótica y estadística, más específicamente a dos investigadores en el área de la robótica por su conocimiento sobre estructuras robóticas y comportamiento en motores que se usan en la industria robótica; dos ingenieros industriales con experiencia en uso de herramientas para el análisis estadístico de datos, un ingeniero mecánico y un ingeniero químico, los cuales tienen conocimiento en sistemas mecánicos de transferencia de calor, líquido, además de conocimiento en sistemas de enfriamiento en máquinas que usan motores eléctricos.

Tabla 4.
Identificación de actores en presentación de resultados del instrumento de entrevista a profundidad

Nomenclatura	Actor	Abreviación del documento	Instrumento
ENTREVISTA 1 Profesional de ingeniería	Ingeniero Químico	E-DOC-1	Entrevista a profundidad
ENTREVISTA 2 Profesional de ingeniería	Ingeniero Mecánico	E-DOC-2	Entrevista a profundidad
ENTREVISTA 3 Profesional de ingeniería	Ingeniera Industrial	E-DOC-3	Entrevista a profundidad
ENTREVISTA 4 Profesional de ingeniería	Investigador	E-DOC-3	Entrevista a profundidad
ENTREVISTA 5 Profesional de ingeniería	Investigador	E-DOC-3	Entrevista a profundidad

La segunda técnica es el análisis FORD, en el cual se realiza una catarsis del funcionamiento, diseño, problemas y limitaciones, en los diferentes métodos usados en sistemas de refrigeración, esto con el fin de determinar las estrategias genéricas que más convenga en función de las características propias y de las que se adapten a las necesidades planteadas en el problema.

Después del primer análisis con las técnicas y herramientas anteriores, se continúa con la segunda parte de la tesis, que es el diseño del modelo 3D del intercambiador de calor y sistema de enfriamiento, mediante el uso del diseño asistido por computadora, con el *software* SolidWorks. Dicho sistema permite realizar el prototipo, el cual es sometido a estudio y análisis, tomando en cuenta otras partes del que esté ensamblado, como la articulación, tubos cobre, cables, bomba y soporte mecánico, para determinar si es adaptable a la articulación robótica hueca. Junto con este proceso, se realiza un diagrama de flujo de procesos, con el fin de graficar lo que conlleva el diseño del sistema de enfriamiento líquido para la articulación robótica hueca, pues permite documentar de manera sencilla y entendible.

Seguidamente, se tiene el prototipo en 3D y de este se construye una versión en físico para el banco de pruebas. Ahora se procede a realizar la simulación con las dos versiones del prototipo 3D y en físico; para la versión en computadora, se realiza una simulación dinámica de fluido computarizada en el *software* SolidWorks, que se usa con el fin de analizar el comportamiento térmico del prototipo y la interacción del fluido en el mismo mediante la simulación. Lo que permite observar si el aumento de la extracción del calor es mejor, el flujo correcto del líquido y si se evita el sobrecalentamiento del intercambiador. Para el modelo en físico, antes de realizar las simulaciones, primeramente, se construye la interfaz gráfica que permite, utilizando un conjunto de imágenes y objetos gráficos, representar la información y acciones disponibles para obtener un banco de pruebas experimental, empleando un sistema de control de recolección de datos del tanque de aceite y el sistema de bombeo, con el fin de compararlos con los datos del simulador.

Teniendo los datos de los simuladores, se procede al análisis de estos mediante el diseño estadístico de experimentos, con el *software* estadístico MiniTab y un análisis de gráficos con el programa Matlab, el cual se usa para el análisis de intercambio de temperatura,

estudiando así el comportamiento de los resultados obtenidos. Esto permite dar un razonamiento lógico acerca de qué factores influyen más en los resultados y cómo se debe reconfigurar la actividad que se estaba realizando para alcanzar los objetivos marcados.

En esta parte final del trabajo de investigación, el análisis costo-beneficio permite medir, principalmente, la relación costo-beneficio, la cual se calcula al dividir el valor actual del beneficio neto, entre el valor actual de los costos de inversión o costos totales del sistema de enfriamiento, y con esto definir si el producto será rentable o no.

4.1. Análisis de la categoría 1

Los métodos actuales más relevantes de la refrigeración térmica en motores, máquinas eléctricas y robots humanoides, mediante un estudio comparativo de diseños, funcionamiento, problemas y limitaciones en sistemas de refrigeración térmica existentes a nivel nacional e internacional, con el fin de conocer las pautas que más se adapten al diseño que se desea.

En el siguiente apartado, se realiza una catarsis del diseño y el funcionamiento de los sistemas de enfriamientos, además del uso de herramientas, técnicas y nuevas tecnologías para el desarrollo de nuevos productos. Todo esto con el fin de determinar las ventajas competitivas y estrategias genéricas que convenga en función de las características propias y de las que se adapten a las necesidades planteadas del problema.

A continuación, se presentan las subcategorías derivadas de las categorías de análisis: Métodos y diseños para el desarrollo de los sistemas de enfriamiento. Las subcategorías son:

- Diseño de sistemas de enfriamientos.
- Funcionamiento de sistemas de enfriamiento.

Para esta parte del análisis de las subcategorías, se utilizan dos técnicas, la primera es la entrevista a profundidad en la cual se obtiene información de mano de expertos en análisis de datos, robótica, sistemas de refrigerantes, etc. La segunda es el análisis FORD que se usa para plantear estrategias competitivas y genéricas bajo análisis de diferentes factores: fortalezas, oportunidades, riesgos y debilidades. Por lo que, a continuación, se presenta en cada subcategoría los resultados obtenidos tras la aplicación de cada una de las técnicas.

4.1.1. Subcategoría: Diseño de sistemas de enfriamiento

Retomando el concepto de los sistemas de enfriamiento, son mecanismos que utilizan propiedades termodinámicas de la materia y mecánica de fluidos, que son diseñados para transferir energía térmica entre dos puntos. Estos puntos suelen ser sistemas termodinámicamente cerrados. Están diseñados primordialmente para disminuir la temperatura y, en el caso de las articulaciones robóticas, sirven para evitar el sobrecalentamiento del motor y enfiarlo; son indirectos, puesto que el líquido absorbe el exceso de calor generado en el motor, para luego transferir al aire, según el libro *Maquinaria y Mecanización Agrícola* de Chaves, A.

Los diseños varían desde el más común que es el de enfriamiento de motores de combustión interna por medio de agua hasta el que se utiliza para el enfriamiento de computadoras. Suelen diseñarse basados en estudios donde se aplican diversas ciencias, tales como la química, en las propiedades y composición de los refrigerantes; la termodinámica,

propiedades de la materia y su energía interna; la transferencia de calor, en el estudio de intercambiadores de calor y soluciones técnicas, así como la mecánica de fluidos.

Tomando en cuenta esto, en esta subcategoría se busca conocer sobre tipos, procesos, problemas y limitaciones, así como otros factores en torno a los diseños de sistemas de enfriamiento, ya sean actuales o antiguos de todo tipo, para así obtener información y dar estrategias a seguir en cuanto a la realización del intercambiador de calor y del sistema de enfriamiento.

4.1.1.1. Entrevista a profundidad

Primeramente, se encuentra el análisis de entrevistas, las cuales fueron aplicadas a profesores de la Universidad Técnica Nacional, con respecto a temas de sistemas de refrigeración. Las entrevistas realizadas son semiestructurales.

El objetivo de las entrevistas ha sido definir los métodos actuales más relevantes de la refrigeración térmica en motores, máquinas eléctricas y robots humanoides, mediante un estudio comparativo de diseños, funcionamiento, problemas y limitaciones en sistemas de refrigeración térmica existentes a nivel nacional e internacional, con el fin de conocer las pautas que más se adapten al diseño que se desea. Para ello, se formularon 16 preguntas. Se definieron los siguientes símbolos para representar diferentes acciones durante la entrevista.

Las entrevistas fueron aplicadas a profesores de la Universidad Técnica Nacional, expertos de la materia desde principios de termodinámica hasta sistemas de refrigeración complejos. El objetivo de las entrevistas ha sido definir los métodos actuales más relevantes de la refrigeración térmica en motores, máquinas eléctricas y robots humanoides, mediante un estudio comparativo de diseños, funcionamiento, problemas y limitaciones en sistemas de

refrigeración térmica existentes a nivel nacional e internacional, con el fin de conocer las pautas que más se adapten al diseño que se desea.

Los sistemas de refrigeración o de enfriamiento son mecanismos basados en los principios de la termodinámica y mecánica de fluidos, que son diseñados para transferir energía térmica entre dos focos. Según Chaves (2004), los sistemas de enfriamiento son llamados indirectos porque el agua absorbe el exceso de calor generado en el motor y luego lo transfiere al aire. En este punto se evidencia esta definición de sistema de enfriamiento indirecto, según la perspectiva y experiencia del profesor de Termodinámica de la Universidad Técnica Nacional:

> Sí hay una diferencia de temperatura muy grande hay más eficiencia, es más fácil enfriar verdad, entonces (entonces) dependiendo de la temperatura, de la diferencia de temperaturas que haya es más eficiente, entonces, la temperatura baja que es la que va a entrar al evaporador la temperatura baja del refrigerante, es decir la que va a entrar en contacto con el brazo mecánico, tenemos la temperatura baja y la temperatura alta es la temperatura en el radiador, entre más alta sea la diferencia entre esas temperaturas más eficiencia va a tener el ciclo de enfriamiento. (Oreamuno, comunicación personal, mayo, 2021)

De esta forma, desde el conocimiento del participante anterior, una de las características más importantes que determinan la eficiencia de un sistema de refrigeración es el correcto cálculo del calor necesario a disipar por el intercambiador de calor para crear una diferencia de temperatura considerable con el líquido que se va a utilizar. Además del principio descrito anteriormente, Cengel y Boles (2014) afirman que el diseño del intercambiador de calor es parte fundamental, la forma más simple de un intercambiador de

calor es un intercambiador de calor de tubo doble (conocido también como de tubo y coraza) clave. Entre los sistemas actuales, se pueden encontrar variedad, todos destinados a trabajos específicos que satisfacen las necesidades de cada caso. Oreamuno (comunicación personal, mayo 2021) menciona los más utilizados en la actualidad:

> Hay muchos acuerdan…de carcasa, hay cruzados, que es como el radiador que a ustedes interesa que es una tubería, por dentro del refrigerante y por fuera hay aire cruzado, el de tubos y carcasa, que es un traje que tiene muchos tubos adentro, por fuera de los tubos tengo un líquido para un fluido y por dentro tengo otro fluido y uno le pasa calor al otro verdad, después puede ser a contracorriente puede ser en paralelo se acuerda puede ser que los dos líquidos entren por el mismo lado y salgan por el otro lado o puede ser que quien sea a contracorriente depende las necesidades que tengo, sí necesito que enfríe muy rápido los meto a contracorriente para que entre en contacto de una vez el líquido caliente, con el frío entonces van atrás rápidamente, pero si quieres que sea más eficiente se mete a contracorriente, entonces me líquido sale por un lado frío, caliente, por un lado frío Por otro lado entonces eso me ayuda. Y bueno hay una gran lista, pero es uno de los más ocupados, más usados.

Por otra parte, los materiales por utilizar también son muy importantes en la elaboración del diseño, el profesor Arce (comunicación personal, mayo 2021) menciona los más utilizados:

> Por ejemplo, el aluminio es un material que tiene al igual que el cobre lo que pasa es que el aluminio tiene la presentación mejor y si se oxida no toma mal color y además el aluminio ustedes ahí lo pueden llevar a nodizar y lo pone naranja, azul … ¿Han

> visto los colores? ese color del aluminio se llama anodizado, es un tratamiento químico que protege usted sabe que el anodizado el aluminio cuando se oxida se pone gris ¿han visto, han visto cuando en el taller, ¿se acuerda María Fernanda? Que le dábamos brillo al aluminio y quedaba como un espejo, pero si usted lo deja se poner gris, usted no le ve herrumbre porque no lo va a producir, porque es no ferroso el aluminio…

Considerando esta recomendación, se decidió utilizar estos materiales mencionados para el diseño, tanto en la simulación en computadora como en la construcción física del sistema de refrigeración por sus características y propiedades.

El propósito de aplicar estas entrevistas consistió en conocer a profundidad el pensamiento de expertos en temas de sistemas de refrigeración, indagar en las fortalezas y debilidades de sistemas utilizados actualmente en la industria, así como escuchar de parte de expertos sus recomendaciones hacia este caso en particular.

Por otra parte, en cuanto al consumo energético que se presenta en una articulación robótica, el experto García (comunicación personal, 2021) menciona: “el consumo eléctrico en cualquier motor siempre va ligado, va a aumentar la corriente cuando se ocupe más toque, entonces, al final si siempre vamos a ocupar más energía, si la carga es muy pesada”, refiriéndose a que es necesario prestar atención desde esa parte del brazo robótico, para que el intercambiador de calor trabaje en sintonía.

Otra de las recomendaciones de Chaves (comunicación personal, 2021) es que el sistema de refrigeración debería ir situado lo más cerca posible al motor que presenta el aumento de temperatura, sin embargo, en aspectos prácticos, esto puede llegar a significar un entorpecimiento del brazo, su movilidad y eficiencia, ya que abarca tamaño y peso, que en

condiciones generales, sumando todos los gastos energéticos que estos representa, pueden ser incluso mayores a los iniciales, por lo cual no son beneficiosos comparados a la condición inicial. Además, a esto agrega: “hay quienes han diseñado sistemas de refrigeración con algún líquido enfriador por dentro, pero si eso falla pues… puede dañar los equipos y más bien perdimos el brazo verdad” (Chaves, comunicación personal, 2021). Representando un riesgo alto para un diseño de prototipo de refrigeración que está pensado para ser añadido a un proyecto existente de la universidad.

El propósito de aplicar estas entrevistas consistió en conocer a profundidad el pensamiento de expertos en temas de sistemas de refrigeración, indagar en las fortalezas y debilidades de sistemas utilizados actualmente en la industria, así como escuchar de parte de expertos sus recomendaciones hacia este caso en particular.

4.1.1.2. Análisis FORD

4.1.1.2.1. Diseño de sistemas de enfriamiento actuales

En el siguiente cuadro, se encuentra la primera matriz FORD, este estudio analiza de manera concisa los sistemas de enfriamiento de motores, principalmente en sus diseños y encuentra estimaciones valiosas sobre nuevos diseños y varios parámetros esenciales diferentes, además de los elementos de uso que afectan. Se plantea cuatro estrategias que son el resultado del análisis del estudio y que proporciona así información sobre cómo han evolucionado los sistemas de enfriamiento de motor a través del tiempo, en lo cual se basa para presentar un nuevo diseño funcional y adaptable a las necesidades del problema de investigación.

Tabla 5.
Diseño de sistemas de enfriamiento actuales

Matriz FORD	Fortalezas (F) Son los puntos fuertes internos: • Al ser más grandes abarcan más líquido y mejoran la eficiencia a la hora de extraer el calor. • Algunos limitan los riesgos asociados a fugas de refrigerantes, reduciendo los riesgos para los motores, para el medioambiente y hasta para las personas. • Ciertos sistemas tienen la posibilidad de realizar sistemas compactos con posibilidad de test de funcionamiento y de prestaciones realizados en fábrica.	Debilidades (D) Son los puntos débiles internos: • Muchas articulaciones robóticas usan sistemas de enfriamiento que son muy pesados y que no se adaptan completamente al diseño de la articulación. • Generan limitaciones a la hora de hacer las tareas que se les programan e inclusive limitaciones en el movimiento. • Algunos sistemas no son adecuados para los motores usados y generan sobrecalientamiento, ocasionando disminución de la capacidad del motor, hasta la falla definitiva. • Y la más importante es que todos los sistemas de enfriamiento que existen hoy en día no se adaptan a la articulación robótica que se desarrolla en el laboratorio de la Universidad Técnica Nacional.
Oportunidades (O) Son oportunidades que se deben aprovechar: • Poder disminuir el sobrecaliento, aumentando la capacidad del motor e inclusive retardar a falla definitiva. • El fácil mantenimiento que tienen, gracias a que cada vez los sistemas de enfriamiento son mejorados. • Poder abrir una gran oportunidad de mercado respecto al uso de sistemas de enfriamiento, en los que no abarquen mucho espacio, no generen mucho peso y que sean fáciles de controlar.	Estrategia FO: • Combinar un diseño de sistema de enfriamiento que tome en consideración un tamaño compacto, ligero, de fácil mantenimiento, todo esto sumado a un sistema sencillo de operar, que cumpla con una eficiente extracción de calor.	Estrategia DO: • Diseñar un sistema de enfriamiento con materiales livianos, que aporten mayor movilidad y adaptabilidad a la articulación sin que interfiera en el funcionamiento y control operativo del brazo robótico.
Riesgos (R) Son los riesgos externos que se deben afrontar: • Que los refrigerantes por usar no sean aptos para los sistemas de enfriamiento. • Fallas en el funcionamiento en general, haciendo que no cumplan con su trabajo. • Materiales que no se encuentren en el país, haciendo que los costes suban y que sean difíciles de importar.	Estrategia FR: • Diseñar un sistema de refrigeración que combine una alta capacidad del motor, tamaño compacto, fácil de operar y de realizar mantenimiento, para así retardar una posible falla del sistema. A su vez, los materiales para la elaboración inicial, así como para repuestos son de fácil acceso en el país, evitando que se incrementen los costos de importación, también reduciendo los tiempos de espera en dicha compra.	Estrategia DR: • Analizar diseños existentes en el mercado, para lograr el descarte de sistemas de enfriamiento que no se adapten a la articulación existente en el Laboratorio de la Universidad Técnica Nacional, tomando las mejores ideas de los sistemas y adaptando materiales de fácil acceso en el país, así como el uso del líquido refrigerante en cantidades y calidad apropiadas.

4.1.1.2.2. Funcionamiento de sistemas de enfriamiento existentes

Tomando como referencia los sistemas de refrigeración de los automóviles, existen dos formatos para estos: por aire y por agua. Los sistemas de aire no son realmente un sistema en sí, además, este tipo de enfriamiento se encuentra a menudo en autos y motocicletas antiguos, mientras que los autos, camiones, remolques, tractores y botes actuales usan sistemas por agua.

El sistema de enfriamiento es una de las partes más importantes para lograr un buen funcionamiento del motor, ya que, en caso de que no funcione correctamente, puede sufrir una falla importante y, en algunos casos, irreparable.

En este cuadro, se muestra la matriz FROD de los diferentes factores que están presentes en el funcionamiento, con lo cual se busca conocer cuáles son los puntos fuertes y débiles de los sistemas actuales, también cuáles oportunidades aprovechar y cuáles riesgos presentan o pueden llegar a afectar a estos sistemas, para así tener un mejor panorama de cómo han evolucionado los sistemas de refrigeración; pues, como se ve en el estado del arte, actualmente muchos sistemas que utilizan los robots, robots humanoides o articulaciones robóticas son más sofisticados, adaptables y livianos. Ya que, a diferencia de los automóviles, los robots necesitan mayor comodidad y ligereza para hacer movimientos más precisos y de los sistemas de automóviles han salido, adaptado, reinventado e innovado todos los sistemas estudiados en la investigación previa, puesto que se busca lo mismo con este análisis o estudio: ver cómo funciona un sistema de enfriamiento existente para así poder adaptarlo y mejorarlo con base en las necesidades de la articulación robótica del laboratorio.

Tabla 6.
Funcionamiento de sistemas de enfriamiento existentes

Matriz FORD	Fortalezas (F) Son los puntos fuertes internos: • Materiales: Los materiales utilizados en sistemas de enfriamiento de mayor magnitud como cobre y aluminio pueden ser adaptados a menor escala y se consiguen en el país. • Existe el sistema de tuberías, por dentro pasa el refrigerante y por fuera hay aire cruzado.	Debilidades (D) Son los puntos débiles internos: • Tamaño: Al ser un motor pequeño, de un solo brazo, cuesta adaptarlo a un sistema de enfriamiento eléctrico, si fuera un estilo de línea de producción de al menos diez brazos, se lograría adaptarlo a un sistema de aproximadamente 7000 u 8000 Watts. • Intercambiador de calor de carcasa: Es uno de los más utilizados actualmente, es de gran versatilidad según la necesidad específica, sin embargo, requiere de constante mantenimiento.
Oportunidades (O) Son oportunidades que se deben aprovechar: • Con un sistema Split pequeño se logra ahorrar energía. • Utiliza el principio de radiador de carros eléctricos actuales.	Estrategia FO: • Diseñar un sistema eléctrico tomando como base los principios del radiador de un carro, donde el sistema de tuberías contiene el líquido refrigerante y se encuentra rodeado con placas y aire, incrementando la extracción de calor, todo elaborado adaptando los mismos materiales utilizados en un sistema tradicional de refrigerado de mayor escala.	Estrategia DO: • Adaptar principios de sistemas de enfriamiento de mayor tamaño a una pequeña escala, logrando la efectividad y eficacia.
Riesgos (R) • Son los riesgos externos que se deben de afrontar: • Posible falla general del sistema por falta de mantenimiento preventivo, así como por una sobrecarga de esfuerzo • Fugas de líquido refrigerante, por una mala conexión de tuberías y/o mangueras.	Estrategia FR: • Utilizar materiales de los mismos sistemas de enfriamiento a gran escala, garantiza el buen funcionamiento, así como la oportunidad de realizar mantenimientos periódicos.	Estrategia DR: • Al implementar un sistema de enfriamiento adaptado a pequeña escala, con el mismo mecanismo se asegura el correcto funcionamiento.

4.2. Análisis de la categoría 2

Diseño en 3D de un intercambiador de calor del sistema de enfriamiento para articulaciones robóticas humanoides, mediante el diseño asistido por computadora, con el criterio de modificación de la pieza para la optimización de la masa e intercambio de calor, obteniendo un prototipo que se ajuste a las necesidades descritas en el planteamiento de problema

En el siguiente apartado, se realiza el diseño 3D del intercambiador de calor que es parte vital del sistema de enfriamiento, en el cual se toman en cuenta su masa y volumen, además de las otras partes del que esté ensamblado como la articulación robótica, tubos cobre, cables, bomba y soporte mecánico. En esta parte se aplica la metodología de diseño, consta de seis pasos básicos dentro de los cuales se cubren las áreas esenciales de la ingeniería, sobre todo, permite llegar a un estado previo, por si se llegan a presentar anomalías o no cumplen con las necesidades planteadas en el problema.

Figura 7.
Metodología del diseño.

Nota. Adaptado de *Diseño y construcción de los sistemas de refrigeración de un vehículo formula SEA eléctrico*, por Cabrera, A. Tigre, E, 2016, Universidad Politécnica Salesiana. (https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13257/1/UPS-CT006846.pdf).

A continuación, se presentan las subcategorías derivadas de las categorías de análisis: diseño CAD de un intercambiador de calor del sistema de enfriamiento con las siguientes variables: , masa. Las subcategorías son:

- Articulación robótica.
- Diseño del intercambiador de calor.
- Construcción del intercambiador de calor.
- Sistema de enfriamiento.

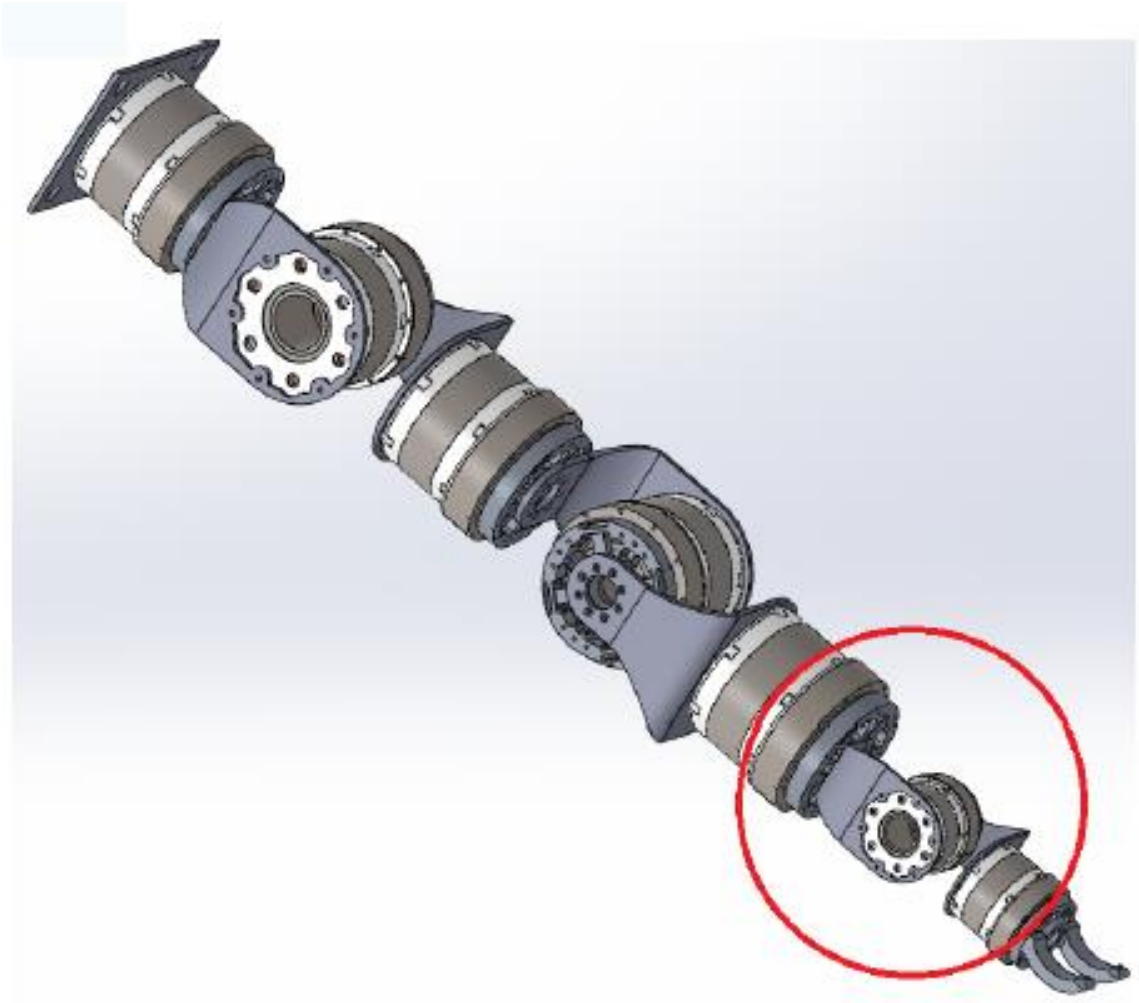
4.2.1. Subcategoría: articulación robótica

Como ya se ha mencionado, en el Laboratorio de Robótica de la UTN se está desarrollando el proyecto de diseño de un brazo robótico propioceptivo para extremidades robóticas con aplicaciones prácticas en robots humanoides, pero en lo que respecta a la problemática del proyecto, radica en que los robots, que necesitan una determinada potencia para realizar tareas que requieren levantar mucho peso, generan una alta demanda energética. Las actuales soluciones se han basado en agregar reducciones mecánicas muy grandes, siendo esto una solución no viable, ya que agrega mucho peso y disminuye la movilidad, así como la eficiencia del motor. Así que el punto principal de la tesis es analizar cuál sistema de enfriamiento es el adecuado para el diseño de la articulación, además, evitar que el motor se sobrecaliente, en especial al trabajar bajo una alta demanda. Cuando se mantiene una adecuada temperatura, se obtiene como resultado una mayor eficiencia, por lo tanto, una menor exposición a una posible falla definitiva del robot.

Así que, en esta parte, se menciona cuál es la situación actual del desarrollo del brazo, con base en el trabajo del máster Mauricio Rodríguez Calvo desarrollador del proyecto, el brazo robótico está conformado por siete articulaciones, las cuales representan los siete

grados de libertad de un brazo robótico humanoide. Este brazo se desarrolla para levantar inicialmente un objeto de 25 kilogramos (Rodríguez, 2021).

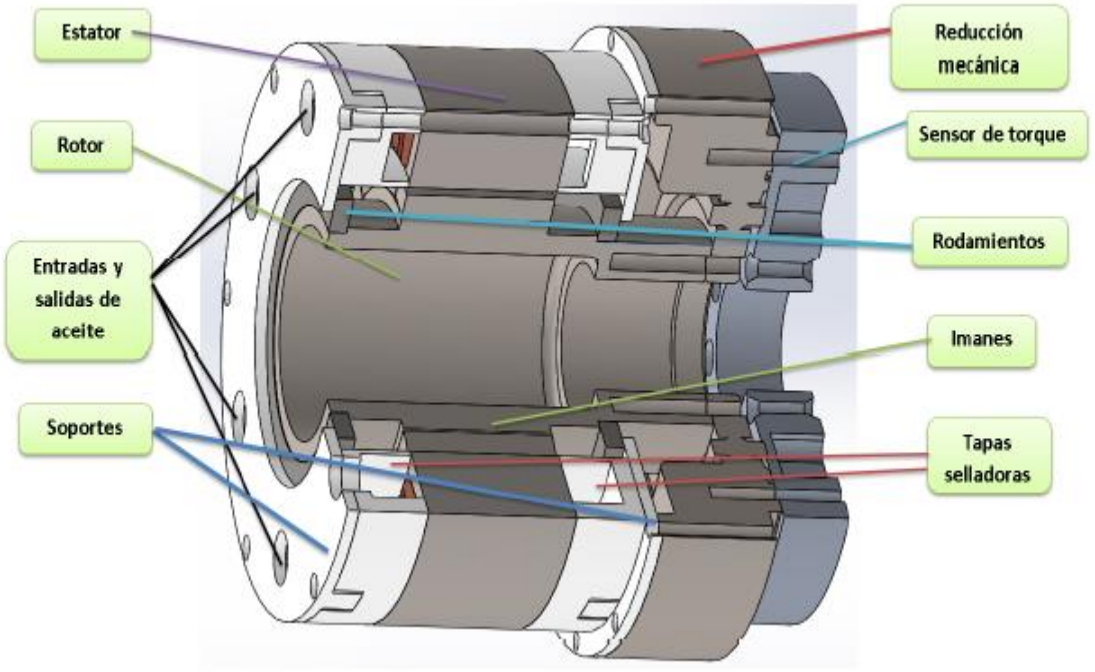
Figura 8.
Última versión del brazo robótico.



Nota: Tomado de *Diseño y evaluación mediante simulación de una articulación inteligente de alto desempeño para robots humanoides*, por M. Rodríguez, 2021, Universidad de Costa Rica (https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/84395?show=full)

Para la situación del motor, se tiene que el mismo llega a una potencia máxima de 880.88 W y que al inyectar líquido dentro del motor alcanza una temperatura de 34,9° C; la parte externa del motor alcanza una temperatura de 29,78° C, la temperatura inicial 24.78° C.; además de que el motor se llega a calentar a una temperatura de entre 120° C a 150° C.

Figura 9.
Última versión de la articulación robótica.



Nota: Tomado de *Diseño y evaluación mediante simulación de una articulación inteligente de alto desempeño para robots humanoides*, por M. Rodríguez, 2021, Universidad de Costa Rica (https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/84395?show=full)

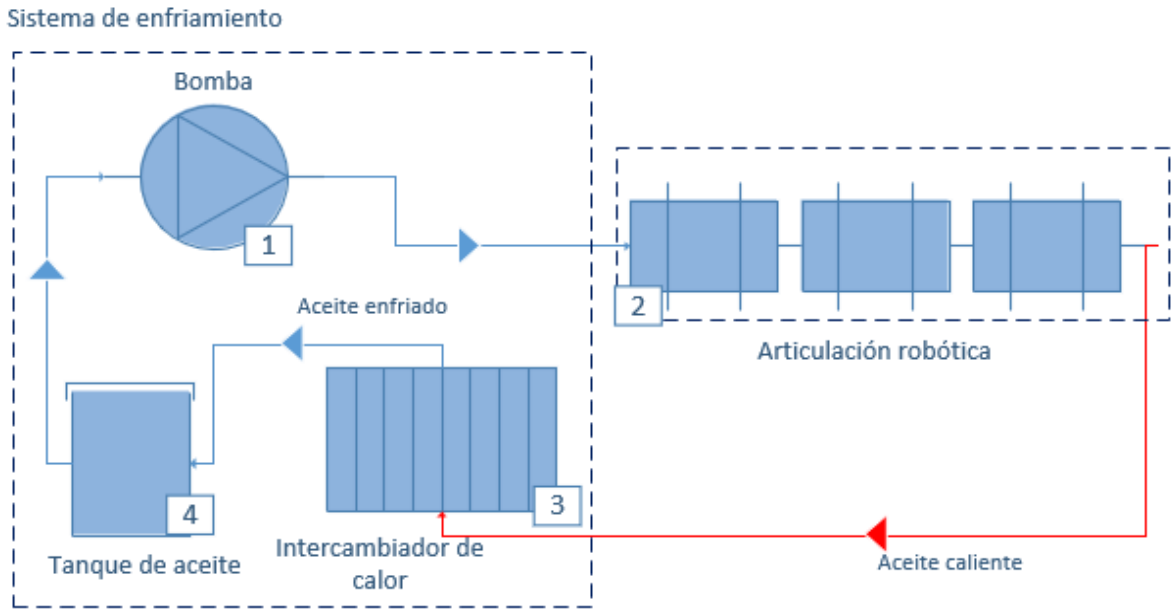
4.2.2. Subcategoría: Sistema de enfriamiento

Para esta parte, se esquematiza y conceptualiza cómo será el sistema de enfriamiento, además, se explica ya la función, la cual es disipar el calor y conseguir que el motor tenga una temperatura adecuada para su buen funcionamiento. Por lo que, para este sistema, la bomba actúa como el corazón, empujando el líquido anticongelante, el aceite dieléctrico ISO-32, a través de todos los canales y mangueras que dan hacia los motores y están conectadas entre sí.

En este caso, la energía generada por el motor eléctrico se convierte en calor, buena parte de ese calor se queda y lo calienta, por lo que se usa el sistema de refrigeración para evitar que se recaliente y el componente clave en este sistema es el radiador, el cual absorbe

el calor generado por el motor el líquido, pasa a través de los tubos del radiador para enfriarlo. Estos tubos son hechos de cobre y con láminas de aluminio para crear aletas de refrigeración, cuando el líquido caliente pase por los tubos, estas aletas transferirán el calor al aire que fluye a través del radiador y las aletas de refrigeración. Desde allí lo llevan por toda la articulación y entre los motores, absorbiendo sus altas temperaturas y regulándolas. Una vez caliente, lo lleva al sistema de enfriamiento por la parte superior al radiador para que se enfríe nuevamente y el aceite enfriado caiga de nuevo en el tanque almacenamiento del sistema.

Figura 10.
Diagrama de sistema de enfriamiento.



4.2.3. Subcategoría: Diseño del intercambiador de calor

La parte central del sistema de enfriamiento es el radiador, que actúa como regulador de la temperatura del líquido y adicionalmente una bomba que es el centro del sistema de enfriamiento y mueve el líquido a través de todos los conductores internos, como si se tratara de un sistema cardiovascular interior. Para esta parte se presentan los cálculos para determinar las dimensiones del radiador y su proceso de diseño en el *software* SolidWorks.

4.2.3.1. Cálculo de las dimensiones del radiador

Tabla 7.
Datos y especificaciones iniciales del motor eléctrico

Característica	Valores
Potencia máxima	880.88 W
Tipo de refrigerante	Aceite Dieléctrico
Eficiencia del motor	91 %
Temperatura del motor	120° C – 150° C

Tabla 8.
Datos y especificaciones del líquido del refrigerante (Aceite dieléctrico ISO-32)

Característica	Valor
Densidad	0,880*x*103 *kg/m*3
Capacidad de calor	1860 J/(kgK)
Conductividad térmica	0.126 W/(mK)
Temperatura máxima	40° C – 50° C
Coeficiente de transferencia de calor	200 W/(m^2K) (Este valor se encuentra dentro del rango de 50 a 350 W/(m^2K) [7])

Para el diseño también se deben considerar los siguientes datos externos:

- La temperatura ambiente = 20 °C = 293.15 K, y
- El coeficiente de transferencia del aire = 75 W/(m2K) (Este valor se encuentra dentro del rango de 10 a 100 W/(m2K)).

Una vez obtenidos los datos descritos anteriormente, se procede con el cálculo para el diseño del radiador, usando las fórmulas aplicadas para el cálculo del área de un radiador para motores eléctricos. Con el fin de obtener la dimensión del intercambiador de calor fue necesario calcular la potencia calorífica, que se representa con $Q_{disipar}$, este dato muestra cuánto calor debe ser disipado por el sistema de enfriamiento. Utilizando P_{salida} = 880.88 W

siendo la potencia máxima del motor y la eficiencia del motor un valor de 0.91. La nomenclatura utilizada en estas fórmulas se muestra a continuación.

$$\dot{Q}_{disipar} = P_{salida} * (1 - eficiencia\ del\ motor) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{disipar} = 880.88\ W * (1 - 0.91)$$

$$\dot{Q}_{disipar} = 79.27\ W$$

Al calcular la potencia a disipar del refrigerante, ahora con el resultado del calor obtenido para disipar del sistema de 79.27 W, se procede a calcular el poder calorífico del refrigerante ($\dot{Q}_{refrigerante}$), utilizando $\dot{Q}_{disipar}$ y un valor de 1.1 que se aplicó como factor de seguridad para evitar el ensuciamiento continuo del radiador.

$$\dot{Q}_{refrigerante} = \dot{Q}_{disipar} * 1.1 \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{refrigerante} = 79.27\ W * 1.1$$

$$\dot{Q}_{refrigerante} = 87.21\ W$$

Ahora, para calcular el área del radiador (A_{rad}) usando el $\dot{Q}_{refrigerante}$ = 87.21 W, el valor del coeficiente de transferencia de calor del aceite (h) = 200 W / m2 K, la temperatura de entrada del aceite ($T_{in.aceite}$) y la temperatura del aire (T_{aire}) siendo 313.15 K y 293.15 K, respectivamente. Finalmente teniendo el valor de A_{rad} es 2.18 m^2.

$$A_{rad} = \frac{\dot{Q}_{refrigerante}}{h*(T_{in.aceite} - T_{aire})} * 10^2 \quad (3)$$

$$A_{rad} = \frac{87.21\ W}{200\ \frac{W}{m^2 * K} * (313.15\ K - 293.15\ K)} * 10^2$$

$$A_{rad} = 2.18\ m^2$$

A continuación, el área del radiador (A_{rad}) se dividió en 35 placas para reducir el tamaño del intercambiador de calor, y se obtiene que el área de cada placa es de 0.062 m^2.

$$A_{placa} = \frac{A_{rad}}{Cantidad\ de\ placas} \quad (4)$$

$$A_{placa} = \frac{2.18\ m^2}{35}$$

$$A_{placa} = 0.062\ m^2$$

Ahora, para poder verificar esto, se aplica la siguiente fórmula, donde U representa el coeficiente de transferencia de calor de aluminio; A es igual al área de la placa y debe mostrar un valor de resultado cercano a la potencia de salida del motor, que es el calor disipado, $T_{in.aceite}$ es la temperatura que entra al radiador y T_{aire} es la temperatura ambiental.

$$Q = U * A_{placa} * (T_{in.aceite} - T_{aire}) \quad (5)$$

Para esto primero se debe calcular el coeficiente de transferencia de calor del aluminio, con la fórmula 6, se calculó el coeficiente de transferencia de calor del aluminio, donde U es el coeficiente de transferencia de calor total del aluminio (W/(m^2K)), k es conductividad térmica del material (W/(mK)), h_{ci} es el coeficiente de transferencia de calor por convección de fluido interior (W/(m^2K)) y h_{co} el coeficiente de transferencia de calor por convección de fluido exterior y, finalmente, s es el espesor de la placa (m). Así se tiene que k = 205 W/(mK), s = 0.5 mm * 10^{-3}m/mm = $5x10^{-3}$ m, h_i = 200 W/(m^2K) y h_o = 75 W/(m^2K):

$$U = \frac{1}{(\frac{1}{h_{ci}} + \frac{s}{k} + \frac{1}{h_{co}})} \quad (6)$$

$$U = \frac{1}{(\frac{1}{200} + \frac{5x10^{-3}}{205} + \frac{1}{75})}$$

$$U = 54{,}58\ W/m^2K$$

Una vez obtenido el valor de U = 54,58 W/m^2 K, luego se procede a calcular el calor a disipar con la fórmula 5, se utilizó una sola placa, esta se representó con una Q, el resultado

fue 62.68 W. El siguiente paso fue obtener el mismo calor para disipar con la diferencia de que en esta ocasión se utilizaron 35 placas, representadas con la misma Q, el resultado fue Q = 2368,77 W. Para cálculo del calor a disipar con una placa:

$$Q = 54{,}58\ W/m^2K * (0.062\ m^2) * ((40\ °C + 273.15) - (20°C + 273.15)) \quad (7)$$

$$Q = 62.68\ W$$

Cálculo del calor a disipar con las 35 placas:

$$Q = 54{,}58\ W/m^2K * (0.062\ m^2 * 35\ placas) * ((40\ °C + 273.15) - (20°C + 273.15)) \quad (8)$$

$$Q = 2368.77\ W$$

Finalmente, con un intercambiador de calor de 2,18 m^2, es posible disipar el calor necesario establecido por las fórmulas 1 y 2. En este análisis no se considera el uso de un ventilador, por tener un diseño más compacto y ligero, pues más adelante con las simulaciones se ve que, sin este, el radiador aun cumple con la función de extraer calor del aceite.

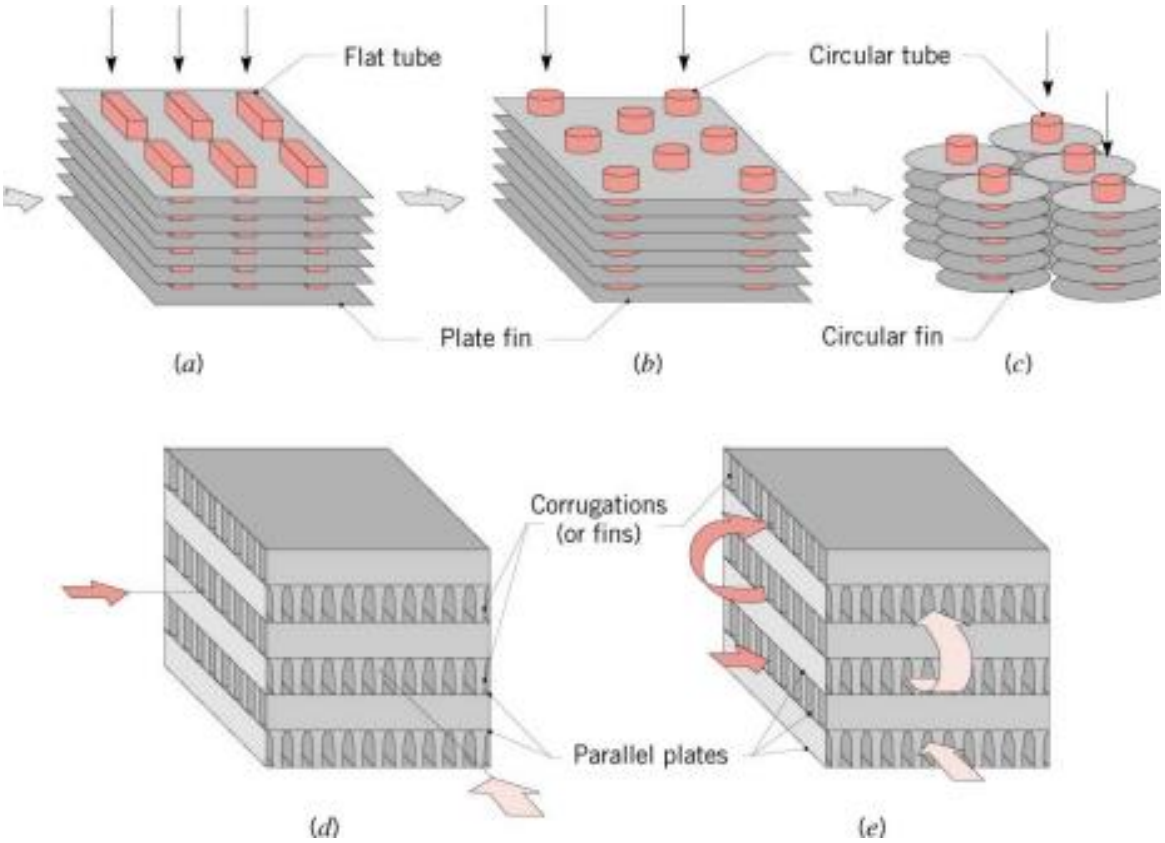
4.2.3.2. Diseño del radiador en SolidWorks

Una vez obtenidos los resultados con las fórmulas anteriores, se procede a diseñar el radiador mediante el *software* de diseño asistido por computadora llamado Solidworks, ya que este permite crear, simular y gestionar modelos o sólidos 3D. Además, mediante simulaciones avanzadas ayudan a observar el rendimiento de los modelos en circunstancias reales.

La técnica suele consistir en hacer los bocetos de las placas y tubos mediante perfiles en 2D y luego utilizando los diferentes comandos para proporcionar la forma sólida. Para, finalmente, tener un ensamble de todos los componentes del radiador.

El diseño del radiador está basado en intercambiadores de menor área y volumen llamados compactos; estos logran elevadas razones de transferencia de calor entre dos fluidos a un volumen pequeño, a la forma en que trabaja se le llama fluido cruzado. Algunos ejemplos se muestran en la figura 11.

Figura 11.
Intercambiadores de calor compactos.

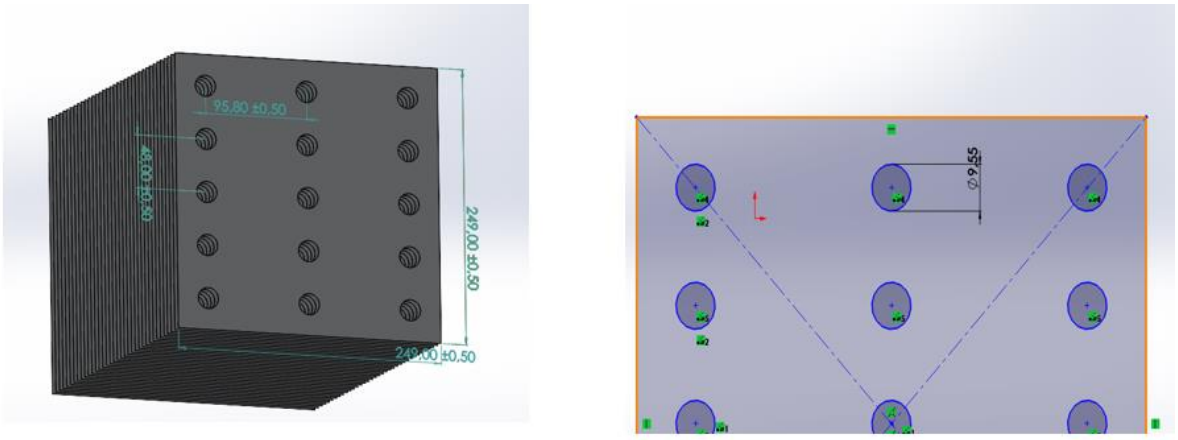


Nota. Tomado de "Metodología para el análisis de un sistema de refrigeración rediseñado para un motor diesel", por Olmeda, P., Torregosa, A. J., Gautier, E., y Romero, C. A. 2008, *Scientia et technica, 1*(38), 193-198 (https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4749094)

Las placas tienen una forma cuadrada de largo = 249 mm y ancho = 249 mm, con un área = 62001 mm2, la cual es el área de las placas según la fórmula 4 y, al multiplicarlo por 35 (cantidad de placas), se obtiene un área = 2170035 mm2, la cual también es el área del radiador según la fórmula 3. Además, cada placa tiene 30 orificios de 9.55 mm de diámetro,

distribuidos en tres columnas de cinco orificios cada uno, con una distancia entre ellos de 48 mm, entre columnas de 98.5 mm, con un grosor de 0.5 mm y con una masa total de 3.084 kg.

Figura 12.
Medidas de las placas:



(a) (b)

Nota. (a) dimensiones en el sólido y (b) diámetro de los orificios en el croquis.

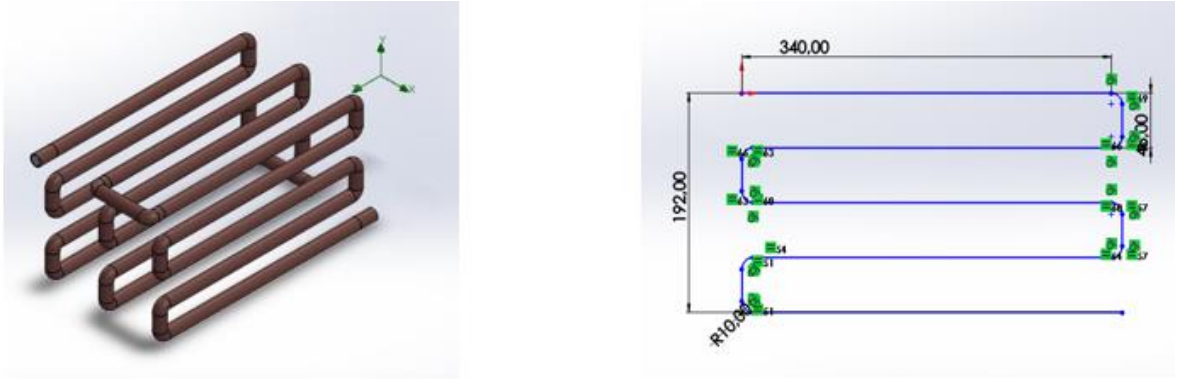
El material usado para las placas es el aluminio, puesto que en el mercado hay una gran variedad de materiales de fabricación: acero, hierro fundido, cobre y están al alcance de todos. Así que el aluminio generalmente es conocido por sus propiedades físicas, una de ellas es su resistencia a la corrosión y excelente conductor de calor, por este motivo, suele encontrarse como material primario en la fabricación de radiadores. Además de que alcanzan la temperatura máxima muy rápidamente, son perfectos para obtener ahorro energético y ligeros.

Figura 13.
Propiedades del aluminio

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	6.9e+10	N/m^2
Coeficiente de Poisson	0.33	N/D
Módulo cortante	2.7e+10	N/m^2
Densidad de masa	2700	kg/m^3
Límite de tracción	68935600	N/m^2
Límite de compresión		N/m^2
Límite elástico	27574200	N/m^2
Coeficiente de expansión térmica	2.4e-05	/K
Conductividad térmica	200	W/(m·K)
Calor específico	900	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Los tubos tienen un diámetro interno = 8 mm y diámetro externo = 9.55 mm, un largo = 340 mm, altura = 192 mm y con una masa total de 4.59 kg.

Figura 14.
Estructura dimensiones de la tubería



Nota. (a) Estructura de la tubería y (b) dimensiones de la tubería en el croquis.

Para el diámetro de los tubos, se basa en la siguiente figura, la cual muestra los diferentes diámetros tanto internos como externos de los tubos de cobre que existen en el mercado. El que se utiliza para el diseño es un tubo de diámetro nominal de 3/8 con 9.52 mm con una tolerancia de 0.03 para el diámetro externo y de 8,00 mm.

Figura 15.
Diámetros de tubo frigorífico de cobre

TUBO FRIGORÍFICO DE COBRE

Diámetro nominal pulgadas	Diámetro exterior mm	Diámetro interior mm	Espesor mm	Sección interior dm^2	Volumen interior dm^3/m	Superficie exterior m^2/m	Peso Kg/m	UNE-EN 12735:1 * Presión admisible	
								Recocido bar	Rígido bar
3/16	4,76	3,24	0,76	0,0008	0,008	0,015	0,085	160	
1/4	6,35	4,83	0,76	0,0018	0,018	0,020	0,119	116	143
1/4	6,35	4,75	0,80	0,0018	0,018	0,020	0,125	122	151
5/16	7,94	6,34	0,80	0,0032	0,032	0,025	0,161	96	118
5/16	7,93	6,31	0,81	0,0031	0,031	0,025	0,162	97	120
3/8	9,52	8,00	0,76	0,0050	0,050	0,030	0,187	74	92
3/8	9,52	7,92	0,80	0,0049	0,049	0,030	0,196	79	97
3/8	9,52	7,90	0,81	0,0049	0,049	0,030	0,198	80	98
1/2	12,70	11,18	0,76	0,0098	0,098	0,040	0,255	55	68
1/2	12,70	11,10	0,80	0,0097	0,097	0,040	0,268	58	72
1/2	12,70	11,08	0,81	0,0096	0,096	0,040	0,271	59	73
1/2	12,70	10,92	0,89	0,0094	0,094	0,040	0,296	65	80

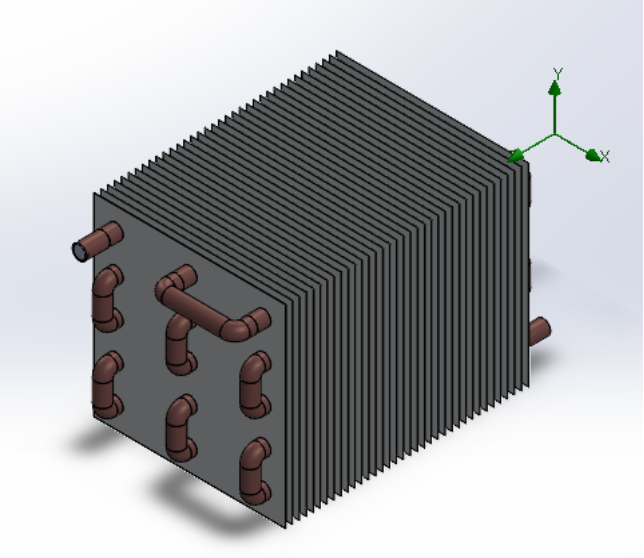
El material usado para los tubos es el cobre, ya que este posee una serie de propiedades que lo hacen el material perfecto para la elaboración de tuberías, por ejemplo, su durabilidad, permite un flujo máximo y es un buen conductor de calor.

Figura 16.
Propiedades del aluminio.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	1.1e+11	N/m^2
Coeficiente de Poisson	0.37	N/D
Módulo cortante	4e+10	N/m^2
Densidad de masa	8900	kg/m^3
Límite de tracción	394380000	N/m^2
Límite de compresión		N/m^2
Límite elástico	258646000	N/m^2
Coeficiente de expansión térmica	2.4e-05	/K
Conductividad térmica	390	W/(m·K)
Calor específico	390	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Finalmente, al unir todas las piezas mediante la función de ensamblaje, se obtiene un radiador que queda con las siguientes dimensiones: una masa = 7.68 kilogramos y un área de superficie = 4.86 metros cuadrados, con placas de aluminio y tubos de cobre.

Figura 17.
Diseño final del radiador



4.2.4. Subcategoría: Construcción del intercambiador de calor

Para la construcción del intercambiador de calor, se tiene la siguiente lista de materiales:

- Láminas de aluminio (1.22 m x 2.44 m) con 0.5 mm de grosor
- Tubo de cobre ¾ de pulgada
- Codos de cobre de ¾
- Soldadura

Las herramientas por utilizar:

- Taladradora de banco.
- Cortadora.
- Tronzadora.
- Pulidora.
- Enderezadora.
- Máquina de soldar.

Inmediatamente, una vez preparados los materiales para la construcción, se procede primero al corte de las láminas de aluminio, haciendo 35 piezas de 249 mm de ancho y 249 mm de largo con la cortadora (ver figura 18). Posteriormente, se comienza a taladrar las láminas para hacer los agujeros con un radio de 9.55 mm, agrupados en tres filas de cinco columnas (ver figura 19).

Figura 18.
Láminas de aluminio cortadas

Figura 19.
Taladrado de las láminas.

Se procede al enderezamiento del tubo de cobre, una vez que sea enderezado, se corta el tubo en 9 secciones con un largo de 340 mm aproximadamente, dos secciones más pequeñas con un largo de 98 mm y 12 secciones de 48 mm (ver figura 20).

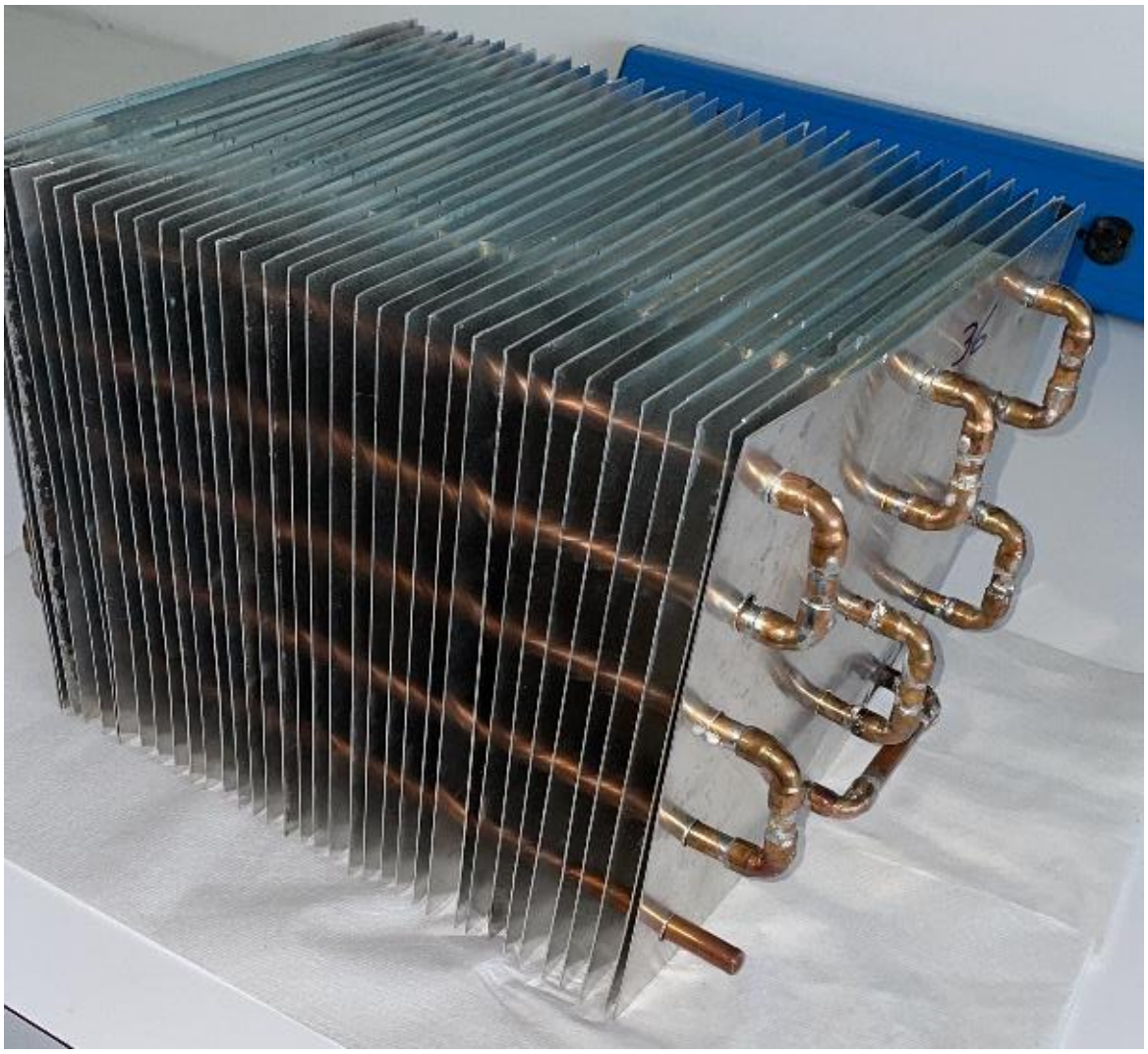
Figura 20.
Tubos de cobre cortados

Una vez hecha la siguiente actividad, ensamblar los tubos y las placas, primeramente, se sueldan los tubos de 340 mm con los de 48 mm mediante los codos. Luego, se unen las tuberías con los tubos de 98 mm, conjuntamente se van insertando las placas de aluminio en los tubos formando la estructura completa del intercambiador de calor (ver figura 21).

Figura 21.
Colocación de las láminas a los tubos.

Para finalizar, se separan las placas y con Epox se revisten las uniones para que se fijen y no haya fugas (ver figura 22).

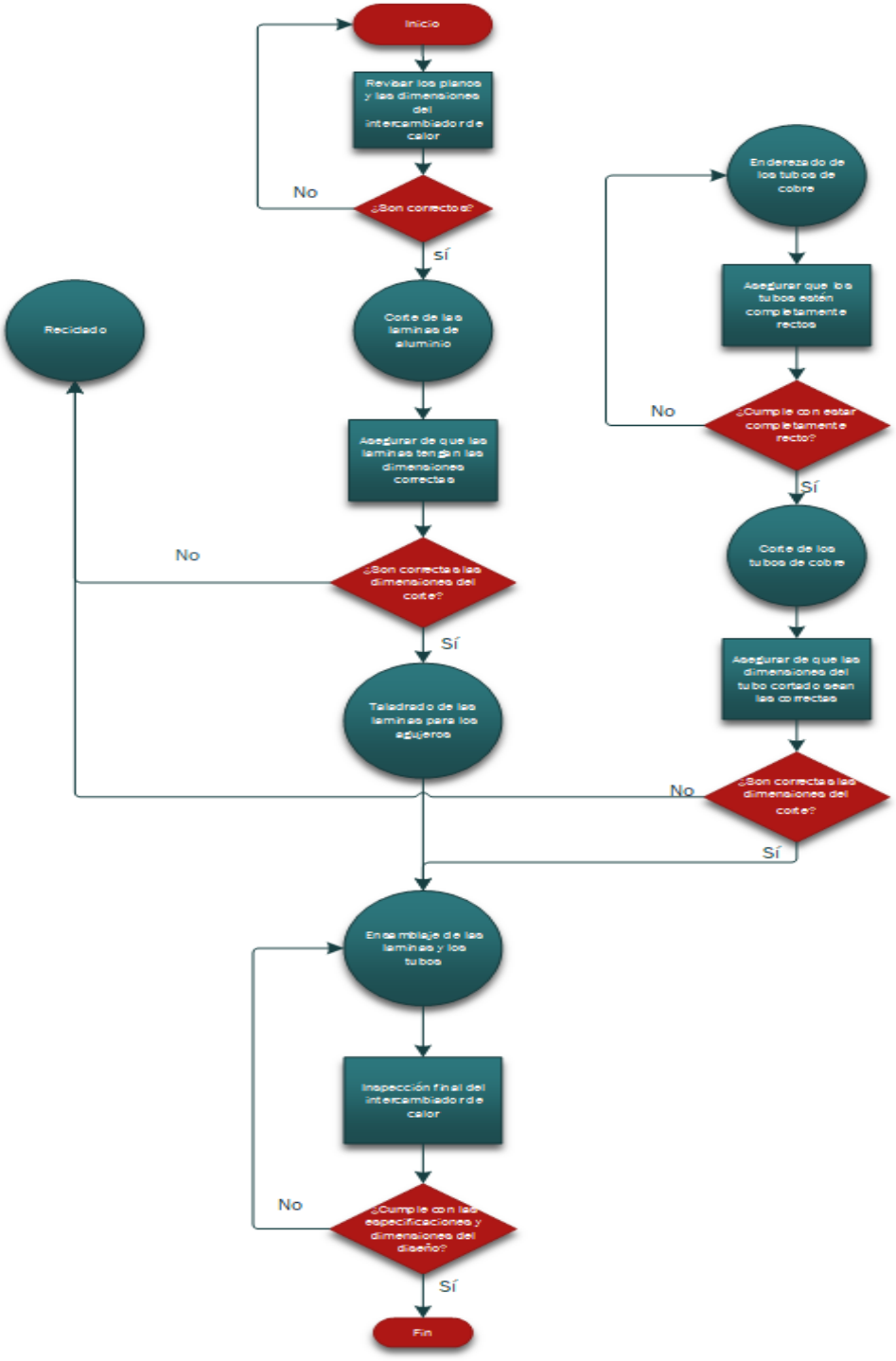
Figura 22.
Radiador terminado.



Seguidamente, usando el diagrama de flujo, se hace un mapeo y documentación sintetizada de todo el proceso de construcción del intercambiador, creando un análisis inicial del método o proceso, con lo que se llega a delinear el flujo de las actividades y percibir una visión amplia del proceso desde el inicio hasta el fin. Asimismo, tener una percepción de los

obstáculos y otros defectos en el proceso, además de una forma fácil de comprender y seguir cómo ocurre el proceso.

Figura 23.
Diagrama de flujo del proceso de construcción del radiador.



4.3. Análisis de la categoría 3

Comportamiento térmico del prototipo de forma experimental, mediante un simulador dinámico de fluido, junto con un diseño estadístico de experimentos para el análisis de los datos obtenidos de la simulación y un análisis costo-beneficio, con el fin de conocer si el prototipo cumple con las especificaciones requeridas, es eficiente y rentable.

En el siguiente apartado final, se presentan tres categorías, la primera consta de la aplicación de un estudio dinámico de fluidos computacional, con el fin de analizar el comportamiento térmico del prototipo y la interacción del fluido en el mismo mediante la simulación, con el fin de observar si la extracción del calor se da de forma adecuada, si el flujo es correcto y si se evita el sobrecalentamiento del intercambiador.

La segunda se basa en el análisis estadístico de los datos experimentales de intercambio de temperatura, estudiando así el comportamiento, relación y diferencias de los resultados obtenidos, que permite dar un razonamiento lógico acerca de qué factores influyen más en los resultados y reconfigurar las actividades que se realizan para alcanzar los objetivos marcados. Dentro del análisis de los resultados del diseño de experimentos, se utilizan herramientas gráficas para comprender de manera visual el comportamiento de los datos. Además, en esta parte también se utiliza la interfaz gráfica para obtener un banco de pruebas experimental, empleando un sistema de control de recolección de datos del tanque de aceite, el sistema de bombeo y del radiador o intercambiador de calor que, como se mencionó anteriormente, es para comparar con los datos de la simulación.

Por último, está el análisis económico del sistema de enfriamiento según el prototipo final, cuyo fin es medir principalmente la relación costo-beneficio, la cual se calcula, al dividir el valor actual del beneficio neto, entre el valor actual de los costos de inversión o costos totales del sistema de enfriamiento, y con esto definir si el producto será rentable o no.

Categorías de análisis: 1. Demostración del comportamiento térmico del prototipo mediante la simulación dinámica del fluido y la simulación física experimental, 2. Análisis de los datos experimentales mediante un *software* estadístico y 3. Análisis económico del sistema de enfriamiento según el prototipo final.

Subcategorías de la categoría de análisis 1:

- Análisis de la extracción de calor.
- Pruebas experimentales.

Subcategorías de la categoría de análisis 2:

- Análisis ANOVA con los datos de los experimentos.

Subcategorías de la categoría de análisis 2:

- Análisis costo-beneficio del prototipo.

4.3.1. Subcategoría: Análisis de la extracción de calor

Esta simulación se realiza para calcular el rendimiento del intercambiador de calor, en términos de extracción de calor, a través de estudios hipotéticos que le permiten llevar a cabo la optimización utilizando los resultados. Para esto, se utiliza la función de Flow Simulation del *software* SolidWorks, en la cual se puede observar el comportamiento de un fluido en ciertas condiciones. Este comportamiento se estudia utilizando método de *Volúmenes finitos*, que permite dividir el fluido en pequeños "bloques" y simular el comportamiento en los vértices de cada uno.

Primeramente, al tener el modelo 3D, se procede a probar si el prototipo es geométricamente correcto para la simulación; esto quiere decir si el intercambiador no

presenta ninguna fuga o una pieza mal colocada, una vez hecha la prueba interna y externa, se comprueba que el modelo es geométricamente correcto.

Seguidamente, se procede a elegir el tipo de simulación: interna o externa, para este modelo se escoge el análisis externo con la característica física de condición de calor en sólidos. Posteriormente, se escogen los fluidos que se utilizan en la simulación, los cuales son el aceite de oliva (Olive oil en inglés, como aparece en el *software*) como el refrigerante que pasa a través del radiador, el cual comparte propiedades con el aceite dieléctrico ISO-32, y el aire como el fluido externo que se encuentra en el ambiente. Y para el sólido (placas de intercambiador) el aluminio.

Luego, se establecen las condiciones ambientales de la simulación mostradas en el siguiente cuadro. Con una condición inicial a 20.05° C para la simulación, bajo el supuesto de que se trabaja en un laboratorio con una temperatura controlada por aire acondicionado, además de que, al no considerar el movimiento del aire, debido a que la articulación no genera movimientos en los cuales provoque fuertes corrientes de aire y que en el laboratorio para el experimento tampoco hay corrientes de aire, por ende, se toma la velocidad en 0 m/s.

Tabla 9.
Condiciones ambientales

Parámetro	**Valores**
Parámetros termodinámicos	Presión estática: 101325.00 Pa Temperatura: 20.05 °C
Parámetros de velocidad	Vector de velocidad Velocidad en dirección X: 0 m/s Velocidad en dirección Y: 0 m/s Velocidad en dirección Z: 0 m/s
Parámetros del sólido	Material predeterminado: Aluminio Temperatura del sólido inicial: 19.00 °C

Una vez establecidas las condiciones iniciales y ambientales, se muestran las condiciones fronteras, las cuales delimitan la simulación. Son el flujo másico de entrada, presión ambiental y pared real, ya que estas son las condiciones en las que se encuentra el fluido antes de ser afectado por el modelo y para proceder con la simulación. Si estos parámetros no están bien configurados, el resultado de la simulación será inútil.

Tabla 10.
Condición de entrada

Parámetros	Descripción
Tipo	Flujo másico de entrada Dirección de los vectores de flujo: Normal al prototipo
Parámetros de flujo	Caudal másico: 0.0100 kg/s Perfil de entrada: 0
Parámetros termodinámicos	Tipo de temperatura: Temperatura de los componentes iniciales Temperatura: 40.00 °C

Tabla 11.
Condición de salida

Parámetros	Descripción
Tipo	Presión ambiental Dirección de los vectores de flujo: Normal al prototipo
Parámetros de flujo	Caudal másico: 0.0100 kg/s Perfil de entrada: 0 Presión ambiental: 101325.00 Pa
Parámetros termodinámicos	Tipo de temperatura: Temperatura de los componentes iniciales Temperatura: 20.05 °C

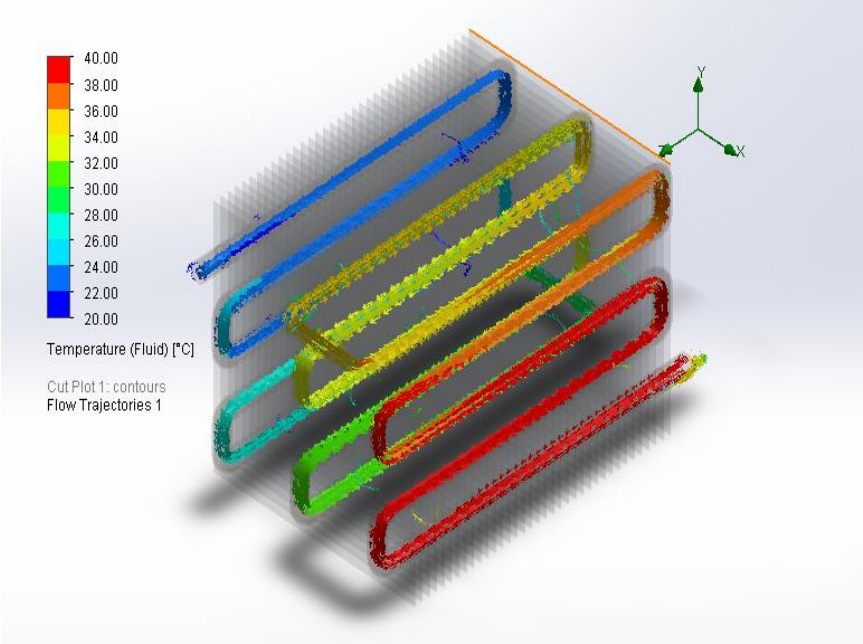
Tabla 12.
Condición de la pared

Parámetros	Descripción
Tipo	Pared real
Coeficiente de transferencia de calor	54.58 W/m^2/K
Temperatura del fluido externo	20.05 °C

Antes de correr la simulación, se establecen las siguientes metas: temperatura máxima del fluido, temperatura máxima de pared y temperatura máxima del sólido, una vez configurados perfectamente el sólido y el fluido, se procede a ejecutar la simulación.

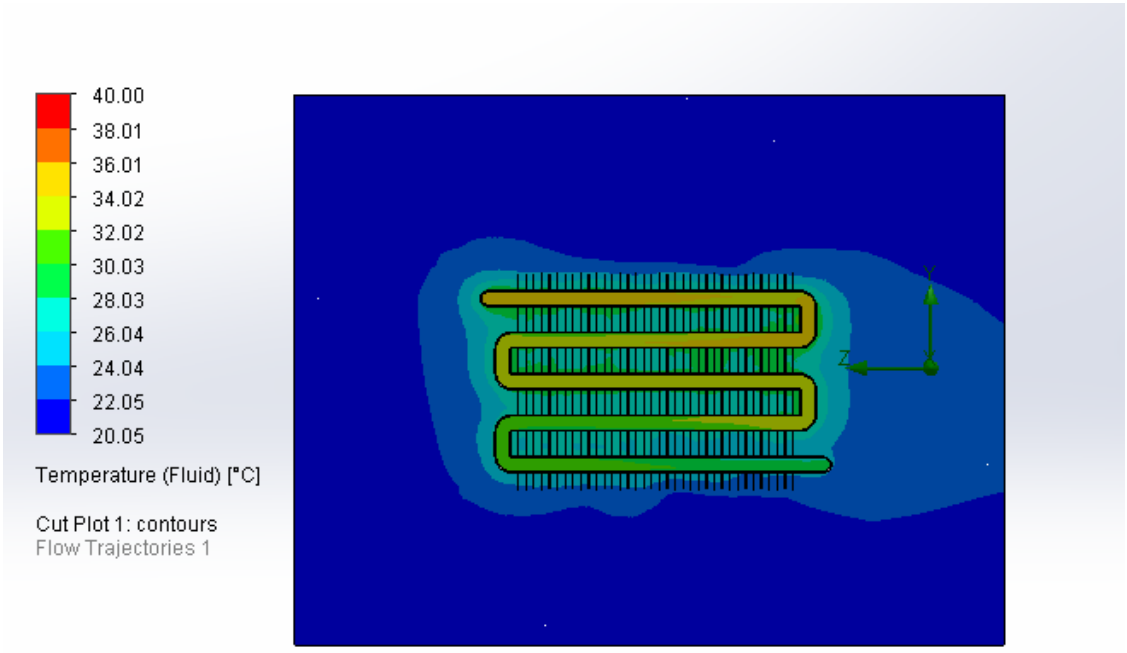
Para los primeros resultados, se muestra la trayectoria del flujo dentro del intercambiador, el criterio de por dónde debe entrar el líquido y por dónde salir; se basa en los radiadores de conexión diagonal a doble cara, con alimentación inferior, por lo que el líquido entra por la parte inferior y sale por la parte superior, esta es una de las formas más comunes y eficientes. Ahora, con base en los resultados de la simulación con respecto al flujo del líquido, se tiene que el aceite entra a una temperatura de 40.00° C y sale a aproximadamente a 22.00° C, esto quiere decir que se reduce a alrededor de 17.00° C – 18.00° C, lo cual es una gran extracción de calor del líquido por parte del radiador, además de que cumple con el principio de un radiador compacto que es lograr elevadas razones de transferencia de calor entre dos fluidos a un volumen pequeño.

Figura 24.
Trayectoria del fluido mostrando la temperatura



La siguiente figura muestra cómo la temperatura ambiente también cambia, esto debido a la expulsión del calor por parte de las placas y tuberías, pasando de 20.00° C a aproximadamente 26.04° C dentro del intercambiador de calor y también muestra la temperatura del fluido dentro de las tuberías. Cabe destacar que se simula con temperatura ambiente controlada y sin algún tipo de corriente que genere movimiento del aire.

Figura 25.
Vista en el plano ZY de la temperatura del ambiente.



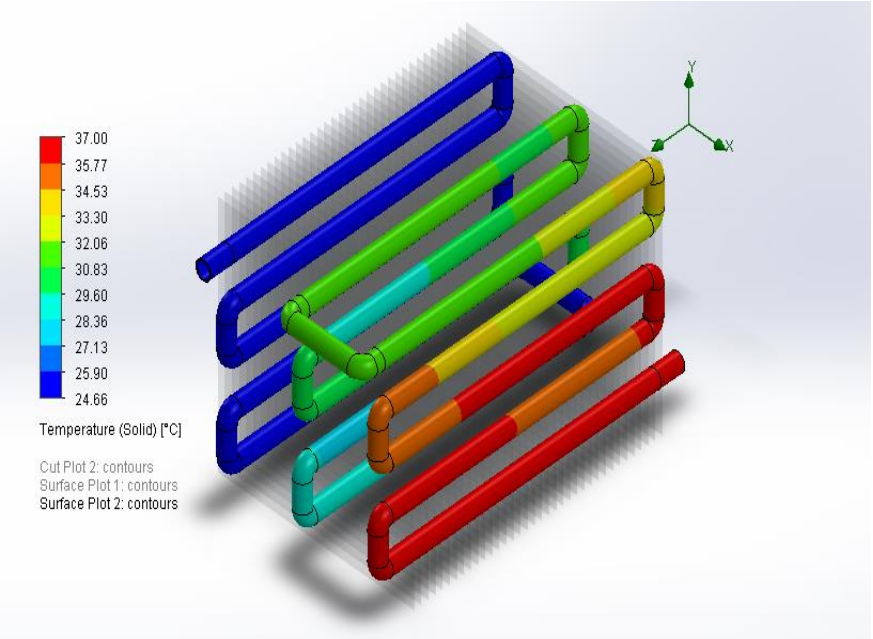
Finalmente, en este cuadro resumen aparece la información de las variables más importantes del fluido dentro de la simulación junto con sus valores mínimos y máximos. Como se puede observar, la temperatura baja de 40.00° C a unos 22.00° C al salir, tal como se explicó anteriormente, la presión se mantiene estable, el aceite se mueve a través del radiador con una velocidad de 0.11 m/s y su densidad de 917.53 kg/m^3.

Tabla 13.
Resultados del comportamiento del fluido durante la simulación

Característica	Valor mínimo	Valor máximo
Densidad [kg/m^3]	917.53	917.53
Presión [Pa]	94769.92	102896.62
Temperatura [°C]	22.00	40.00
Velocidad [m/s]	0.00	0.11

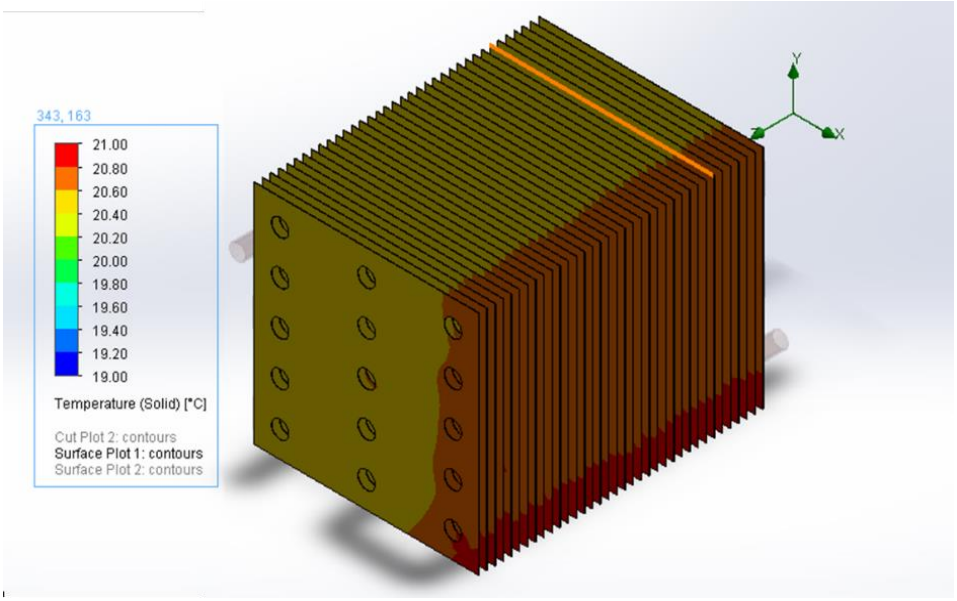
En cuanto al comportamiento de los sólidos (placas y tubos), para estos los resultados de la simulación son que la tubería es la que presenta más variación en diferentes partes de toda la pieza, puesto que inicia con una temperatura de 20.00° C, pero a la hora de entrar en contacto con el aceite caliente, mientras este avanza por los tubos, va aumentando la temperatura de los mismos, ya que va absorbiendo el calor, así que su temperatura más alta es de 37.00° C al inicio donde va entrando el líquido y para la más baja de aproximadamente 24.66° C. Esto quiere decir que sí se da un cambio de calor entre los tubos y el líquido.

Figura 26.
Temperatura de la tubería.



En cuanto a las placas, las cuales funcionan para extraer más calor, presenta una variación menor para toda la pieza, puesto que inicia con una temperatura de 19.00° C, pero, a la hora de entrar en contacto con el calor de los tubos, estos pasan calor a las placas, va aumentando la temperatura, así que su temperatura más alta es de 21.00° C al inicio, donde va entrando el líquido a la temperatura máxima y para la parte media y final, la temperatura es de aproximadamente 20.00° C. Esto quiere decir que sí se da un cambio de calor, pero es mínimo, ya que la mayoría la absorbe los tubos de cobre.

Figura 27.
Temperatura de las placas.



Ahora se presenta un cuadro resumen de las características termodinámicas dentro de la simulación junto con sus valores mínimos y máximos. Ya que en la ingeniería estas características son necesarias para el cálculo de las pérdidas de calor, para el diseño de intercambiadores de calor y la determinación de las necesidades de energía para la refrigeración y la calefacción. También con el fin de entender los procesos en los que se

transfiere el calor como conducción de calor (conducción) y flujo de calor (convección). Algunos presentes en el cuadro resumen son el flujo de calor, la cual es la medida de transferencia de calor, por una diferencia de temperatura y se da un equilibrio de temperatura entre las sustancias.

La otra es el coeficiente total de transferencia de calor o valor U, que representa la eficiencia en la que se conduce el calor a través de una serie de medios resistentes, en este caso el cobre y el aluminio. Este dato se refiere a cuanto más grande el coeficiente, más fácil se transfiere el calor, así que, cuanto más grande el valor de U, más grande es la tasa de transferencia de calor, por lo que, al conocer el rango de un valor U y elegir las condiciones que lo hagan más alto, se puede acortar los tiempos por lote y aumentar la producción/ingresos.

Tabla 14.
Resultados de las características termodinámicas durante la simulación

Característica	Valor mínimo	Valor máximo
Flujo de calor [W/m^2]	0.52	24623.75
Coeficiente de transferencia de calor [W/m^2/K]	0.006	20469.81
Flujo de calor superficial [W/m^2]	-24724.98	3680.87
Flujo de calor superficial (Conducción) [W/m^2]	-877.10	877.10
Flujo de calor superficial (Convección) [W/m^2]	-1.317×10^{7}	5759390.35

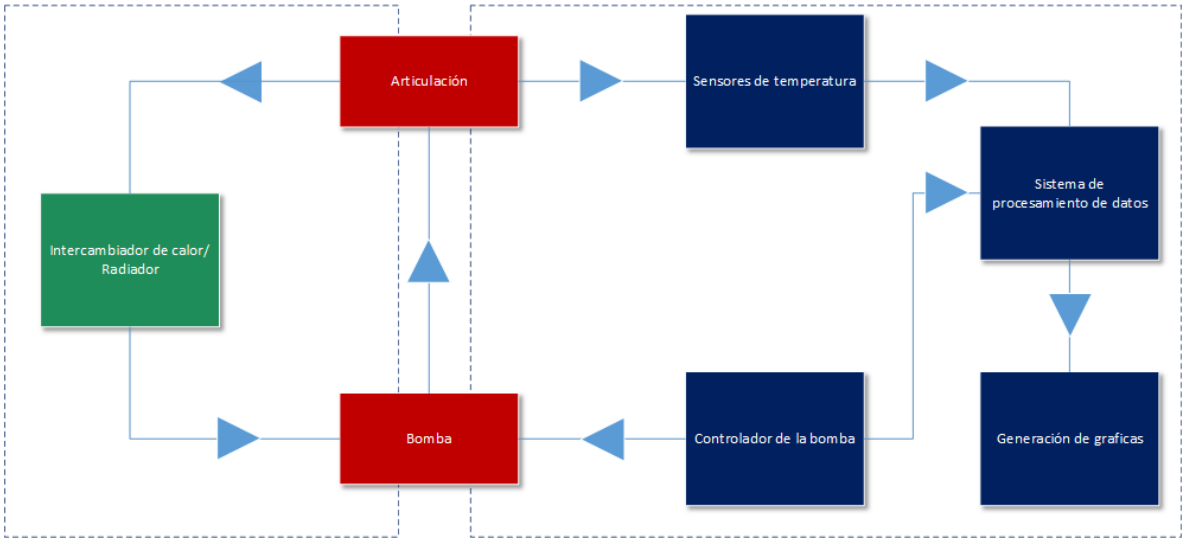
4.3.2. Subcategoría: Pruebas experimentales

El sistema de refrigeración del banco de pruebas está compuesto por la bomba, radiador, articulación, controlador de la articulación y controlador de velocidad de la articulación, sistema de potencia de la bomba y el controlador de esta. La configuración antes indicada se realiza debido a que es como se conceptualizó, siendo un sistema centralizado, además de que el experimento se extrae una vez el aceite ya calentado del motor, por lo cual la bomba lo extrae directamente del mismo y luego enviándolo a que el intercambiador de color haga su función y reduzca la temperatura del aceite. También se colocan siete sensores de temperatura, uno en la salida y otro en la entrada de los tubos del radiador, uno en la entrada y salida de la articulación, uno en una de las placas de aluminio del radiador y los otros dos en el estator y devanado del motor. En la figura 28, se muestra el banco de pruebas instalado para poder realizar los experimentos.

Figura 28.
Banco de pruebas

El diagrama de la figura 29 muestra cómo se distribuye el sistema de refrigeración en el banco de pruebas experimentales; tiene su configuración en el siguiente orden: Bomba-Articulación–Radiador, donde existe un bucle que va de la articulación a la bomba, esta envía el aceite al radiador y de nuevo a la articulación, además de que los sensores están conectados al sistema de procesamiento y generador de gráfica de datos.

Figura 29.
Distribución de la prueba experimental



4.3.2.1. Pruebas del intercambiador de calor

Finalmente, se ejecutaron un total de cinco pruebas, de estas se analizaron tres, denominadas: Experimento 2, Experimento 3, Experimento 4, estas pruebas consistieron en la demostración en tiempo real del funcionamiento del intercambiador de calor, fueron efectuadas el mismo día, por el mismo operador y durante la misma cantidad de tiempo, el factor a considerar es temperatura en grados centígrados, se calentó e inyectó el aceite a 18 °C, 20 °C y 28 °C respectivamente. Cuentan con los mismos sensores de temperatura, que para su entendimiento en las gráficas su Nomenclatura sensores es la siguiente: HE outlet:

Intercambiador de calor en la salida, HE wall: Placa de Aluminio, Stator: Estator del motor, End-winding: Devanado, HE inlet: Intercambiador de calor en la entrada, Joint inlet: Articulación en la entrada y Join outlet: Articulación en la salida. Seguidamente la ejecución de los experimentos. Y con la ayuda del programa Matlab se puede recolectar y graficar los datos en el mismo tiempo en el que se corrían los experimentos, permitiendo así ver cómo se comporta el sistema, generando el banco de datos y además para que posteriormente se realice el diseño estadístico de experimentos con su respectivo análisis.

4.3.2.1.1. Experimentos

En esta sección, se muestran los datos de cada experimento realizado, además de sus gráficas generadas, con el fin de entender puntualmente qué sucedió y cómo se comportó el radiador y todo el sistema.

Experimento 1. El primer intento de correr la simulación en el banco de pruebas fue fallido, ya que, como se puede observar en la gráfica, hubo un cambio brusco al encender la bomba. Esto ocurre debido a que la corriente que brinda la bomba era muy alta para el interruptor que se utilizó, lo que generó que se fundiera. Si bien este primer experimento no fue exitoso, fue de gran ayuda, ya que trabajó como un mecanismo de defensa para el sistema de protección de la bomba, donde se quemó el interruptor y no el controlador de la bomba, lo que pudo ser peor.

Figura 30.
Gráfico temperaturas versus tiempo: Experimento 1.

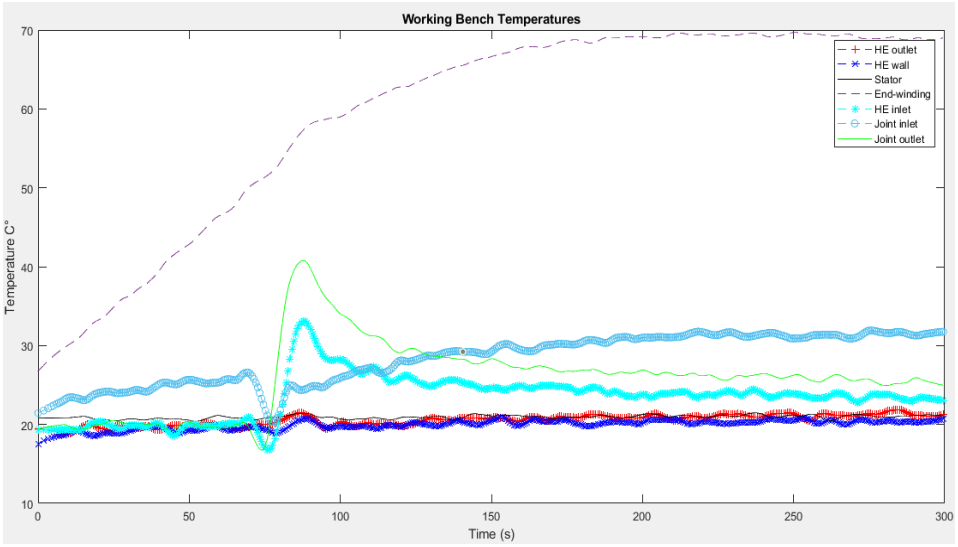
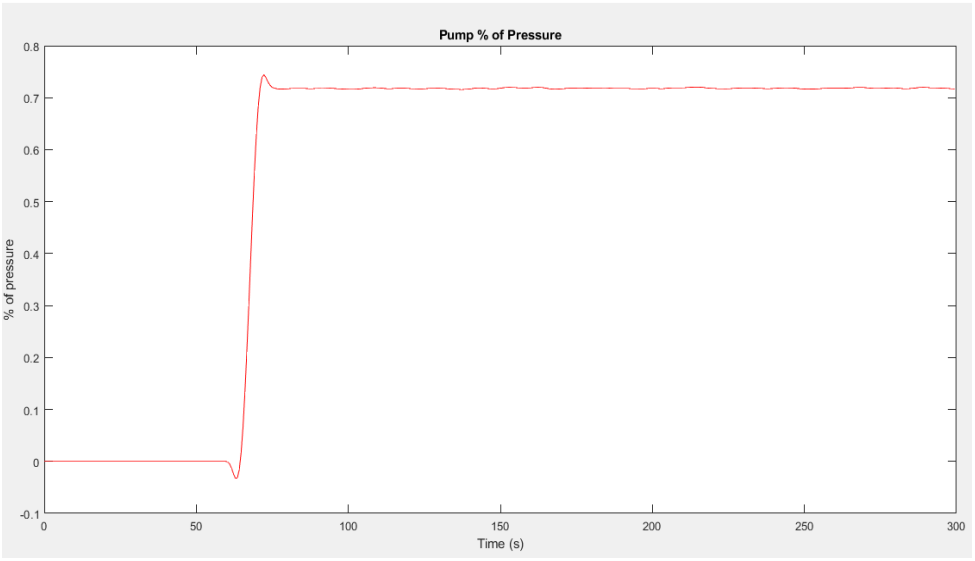


Figura 31.
Gráfico presión de la bomba durante el Experimento 1.



Experimento 2. En el experimento 2 se aprecia como el intercambiador de calor inicia a trabajar aproximadamente a los 30 segundos de encendida la bomba, donde el factor temperatura utilizado es de 18 grados centígrados, seguidamente la temperatura comienza a ascender y alcanza los 64°C, sin embargo, logra bajar la misma hasta 52 °C, para posteriormente mantenerse relativamente constante en una temperatura de 55 grados.

Figura 32.
Gráfico temperaturas versus tiempo: Experimento 2

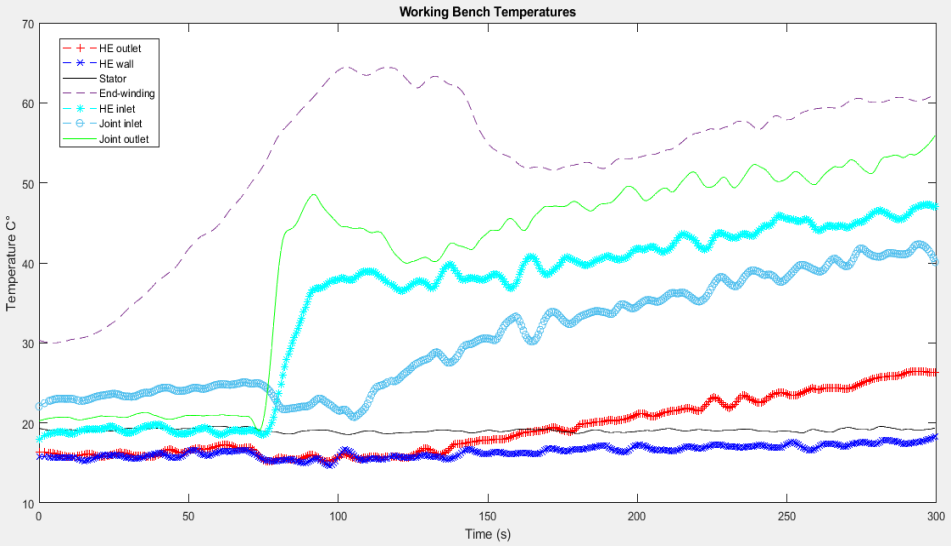
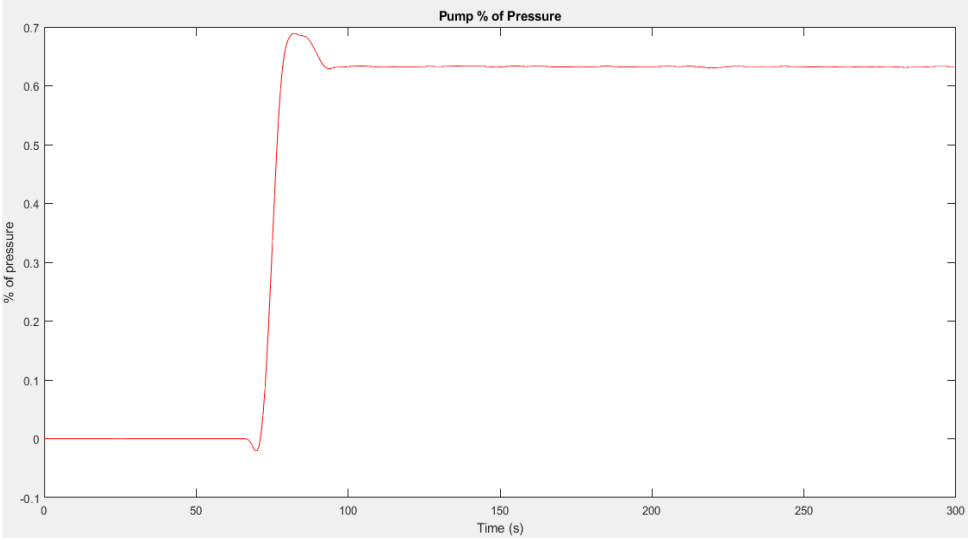


Figura 33.
Gráfico presión de la bomba durante el experimento 2



Con base en la gráfica anterior, la tabla 15 muestra, a continuación, los datos extraídos de intercambio de temperaturas del HE inlet y HE outlet.

Tabla 15.
Observaciones experimentales Experimento 2

Sensor HE inlet (entrada)	Sensor HE outlet (salida)	Diferencia de temperatura
36,85	16	20,85
37,6	15,88	21,72
38,67	16	22,67
37,97	16,38	21,59
37,6	17,37	20,23
37,9	17,72	20,18
39,25	17,88	21,37
38,14	17,92	20,22
38,59	17,96	20,63
37,4	18,37	19,03
40,17	19,2	20,97
40,37	19,21	21,16
40,37	19,23	21,14
40,76	19,14	21,62
41,98	19,96	22,02
43,14	20,32	22,82
43,35	20,45	22,9
44,09	21,03	23,06
46,12	20,81	25,31
46,36	26,41	19,95
47,09	26,34	20,75

Nota. Valores de temperaturas en ºC.

Experimento 3. En este experimento igualmente el intercambiador de calor comenzara a funcionar a los 30 segundos, en este experimento el factor temperatura ingresa con una temperatura de 20 °C, se visualiza como la temperatura sube hasta los 55 grados centígrados, se logra bajar y consecuentemente cuando el líquido comienza a circular se estabiliza en alrededor de 64 grados centígrados.

Figura 34.
Gráfico temperaturas versus tiempo: Experimento 3

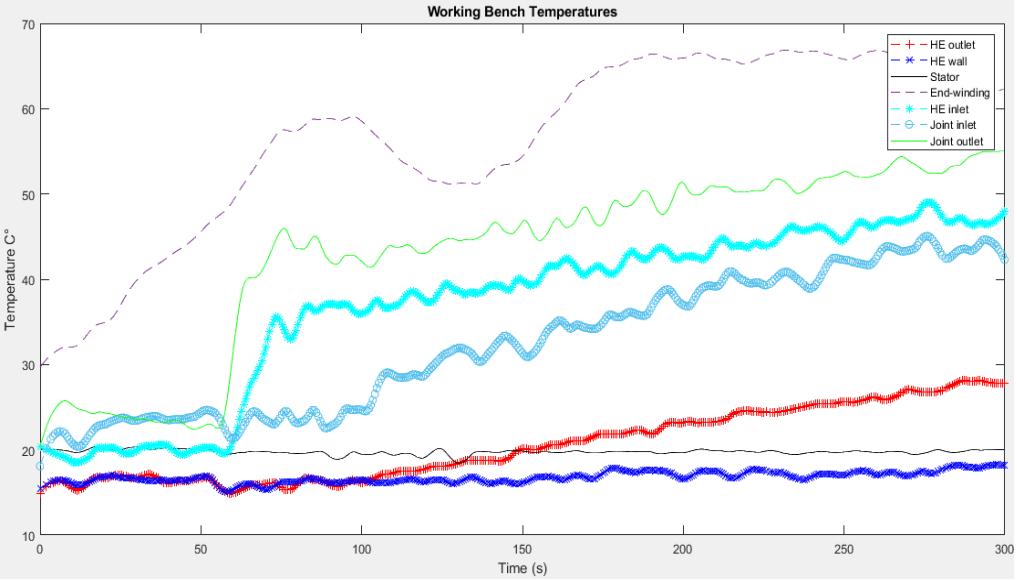
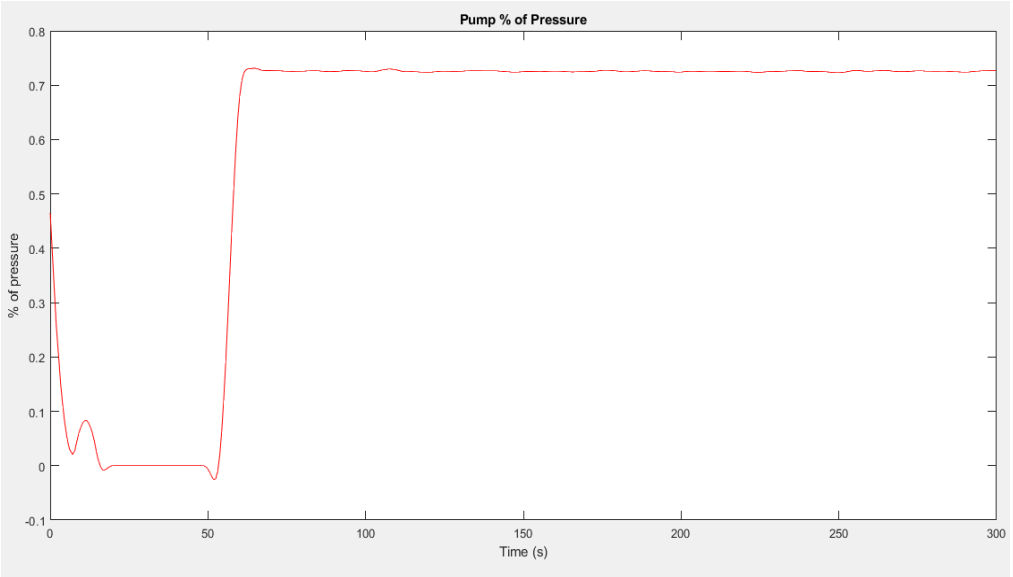


Figura 35.
Gráfico presión de la bomba durante el Experimento 3



Al igual que el anterior, se muestra el gráfico correspondiente de presión de la bomba del experimento, acá hubo un pequeño error humano, porque se dejó encendida la bomba del experimento anterior, pero, igualmente, comienza su funcionamiento al mismo tiempo establecido.

Tabla 16.
Observaciones experimentales del Experimento 3

Sensor HE inlet (entrada)	Sensor HE outlet (salida)	Diferencia de temperatura
34,71	16,06	18,65
36,82	15,6	21,22
37,11	16,81	20,3
36,19	17,53	18,66
37,12	18,05	19,07
38,2	18,67	19,53
37,66	18,76	18,9
38,87	19,91	18,96
38,55	20,42	18,13
39,29	21,01	18,28
40,05	25,58	14,47
41,34	21,84	19,5
42,17	21,95	20,22
40,65	22,96	17,69
41,21	23,18	18,03
42,43	24,11	18,32
43,47	24,46	19,01
43,97	24,42	19,55
45,71	25,25	20,46
46,54	27,06	19,48
47,65	27,85	19,8

Nota. Valores de temperaturas en ºC.

Experimento 4. Al igual que los demás, el intercambiador de calor comienza a funcionar a los 30 segundos, el factor temperatura fue de 28 °C, en la tabla de datos que se muestra a continuación se aprecia como la diferencia de calor final se ve afectada, muestra un intercambio menor, se aprecia como la temperatura sube hasta los 55 grados centígrados y se logra bajar, luego cuando el líquido comienza a circular se estabiliza en alrededor de los casi 60 grados centígrados.

Figura 36.
Gráfico temperaturas versus tiempo: Experimento 4

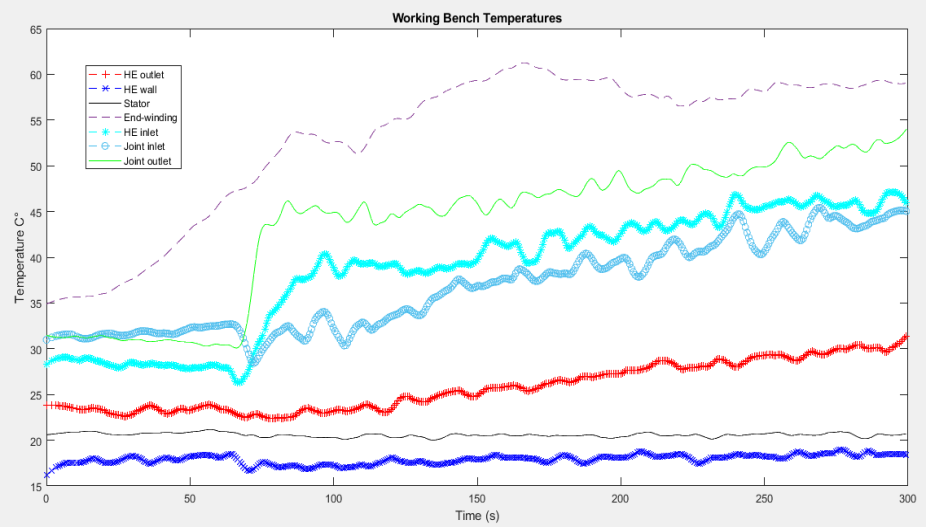
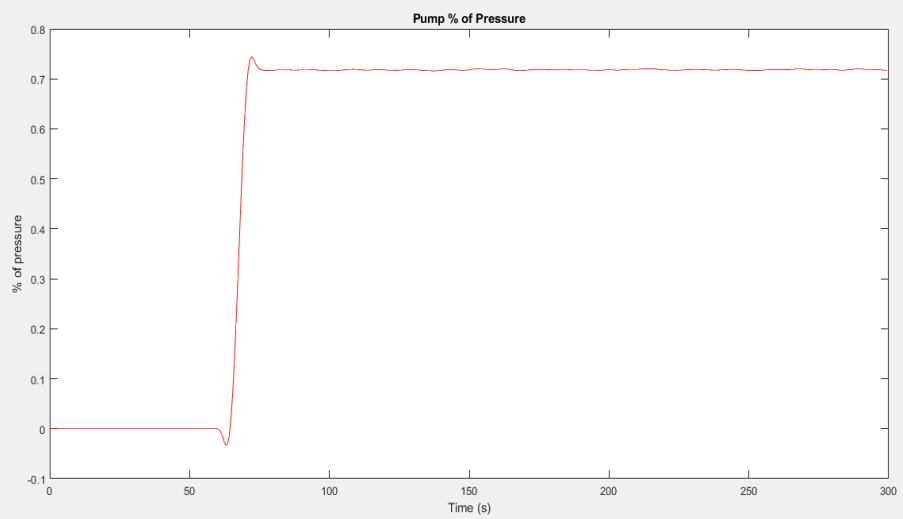


Figura 37.
Gráfico presión de la bomba durante el Experimento 4



A partir de la gráfica anterior, se muestran, a continuación, los datos extraídos de intercambio de temperaturas del HE inlet y HE outlet.

Tabla 17
Observaciones experimentales del Experimento 4

Sensor HE inlet (entrada)	Sensor HE outlet (salida)	Diferencia de temperatura
37,55	22,44	15,11
38,95	22,87	16,08
39,76	23,46	16,3
39,62	23,34	16,28
39,38	23,88	15,5
38,85	23,78	15,07
38,8	24,52	14,28
39,55	25,2	14,35
41,87	25,36	16,51
41,42	25,82	15,6
39,79	25,89	13,9
42,67	26,36	16,31
41,88	26,99	14,89
43,31	27,27	16,04
41,99	28,65	13,34
43,23	28,42	14,81
43,26	28,71	14,55
43,1	29,3	13,8
44,77	30,36	14,41
46,16	30,08	16,08
46,74	30,97	15,77

Nota. Valores de temperaturas en ºC.

Experimento 5. Este último experimento es peculiar, después de finalizados los experimentos, se debía dar un tiempo prudente para que el aceite se enfriara; en este caso, se decidió prender la bomba, pero no calentar el aceite; con esto se obtuvo que, estando el aceite caliente en 65º grados, rápidamente, el intercambiador de calor enfrió ese liquido 47 grados en menos de 100 segundos, a los 5 minutos llegaba a los 41 grados. Esto demuestra, de nuevo, que este radiador es eficaz reduciendo la temperatura rápidamente cuando esta se encuentra muy caliente. Mientras que, una vez ronda los 40 grados, ya lo mantiene más que enfriar. También se puede comparar que el trabajo de enfriar el aceite sin el sistema de enfriamiento duró aproximadamente 25 minutos, mientras que con el radiador en 5 minutos ya estaba listo.

Figura 38.
Gráfico temperaturas versus tiempo: Experimento 5

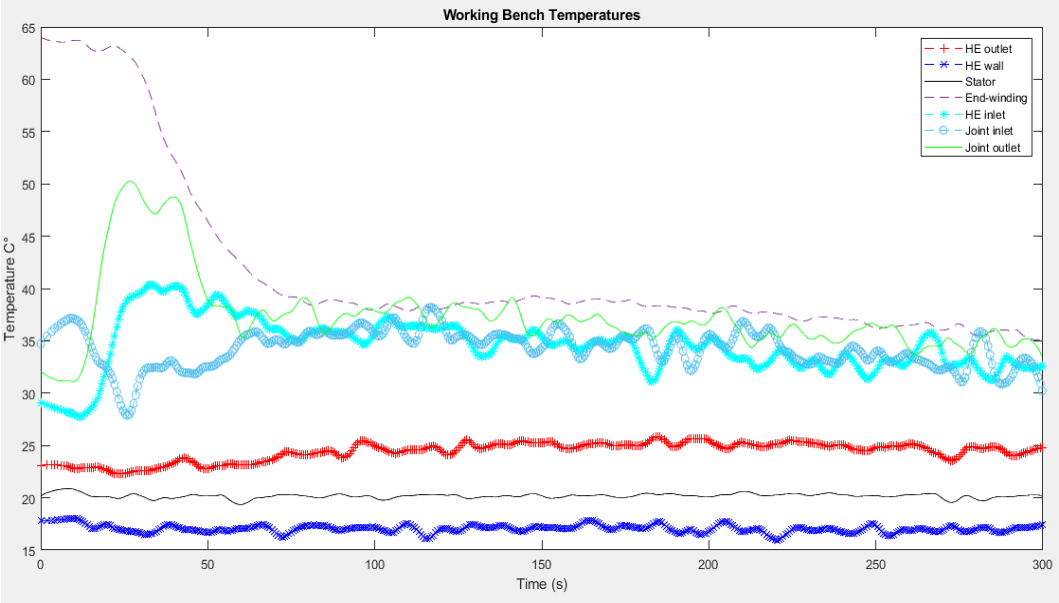
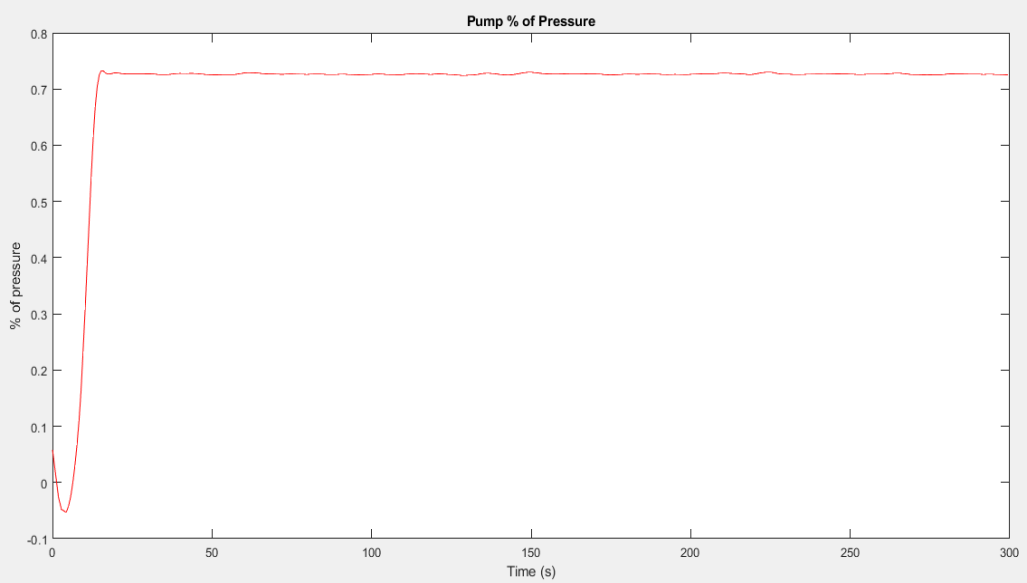
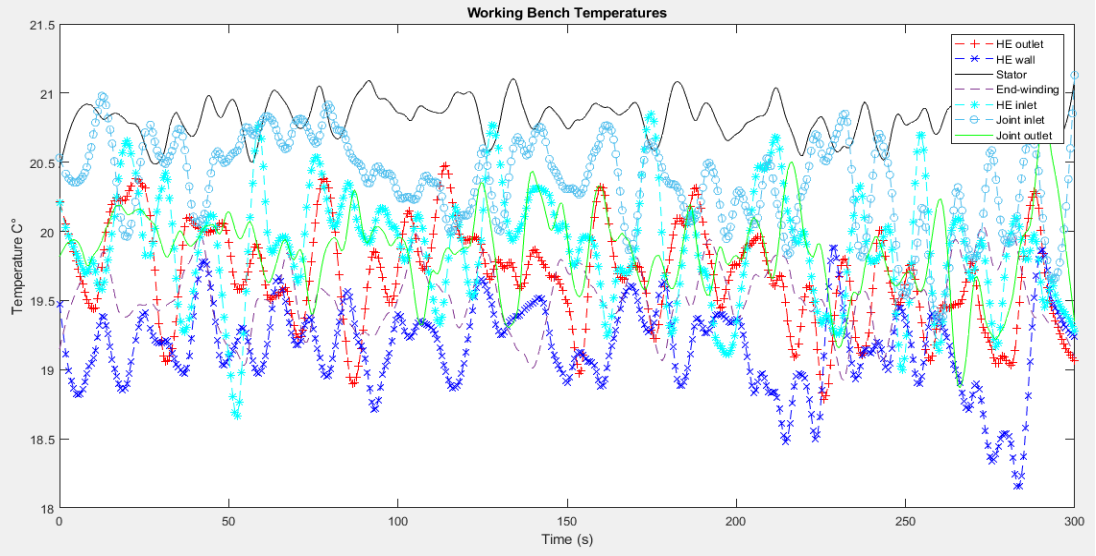


Figura 39.
Gráfico presión de la bomba durante el Experimento 5



El gráfico de la figura 40, a continuación, muestra el error o ruido que presentan los sensores al estar conectados al *software* Matlab, esta ronda en una media entre 19,5 y 21 grados centígrados, y resulta entre 1,5 y 2 grados de error. Esto ayuda a darle más realismo y sentido a los datos extraídos y estudiados.

Figura 40.
Gráfico de error de los sensores



4.3.3. Subcategoría: Análisis ANOVA con los datos de las simulaciones

4.3.3.1. Ejecución del diseño estadístico de experimentos

A continuación, se muestra el escenario donde se evaluó por 5 minutos cada uno de los factores de interés con sus respectivos factores, (Experimento 2 (18 °C), Experimento 3 (20°C) y Experimento 4 (28°C)), para averiguar la variable de interés que consiste en estudiar y controlar el rango de temperatura que permite al radiador operar de manera eficiente. Se tomaron 21 observaciones experimentales por cada factor, para un tamaño total del experimento de 63 observaciones

4.3.3.1.1. Prueba de normalidad

Se desea evaluar el intercambio de temperatura del sistema de refrigeración para determinar si los datos siguen o no una distribución normal, con el fin de, posteriormente, realizar un análisis de varianza con estos datos. Hipótesis para prueba de normalidad:

- H0: Los datos siguen una distribución normal.
- H1: Los datos no siguen una distribución normal.

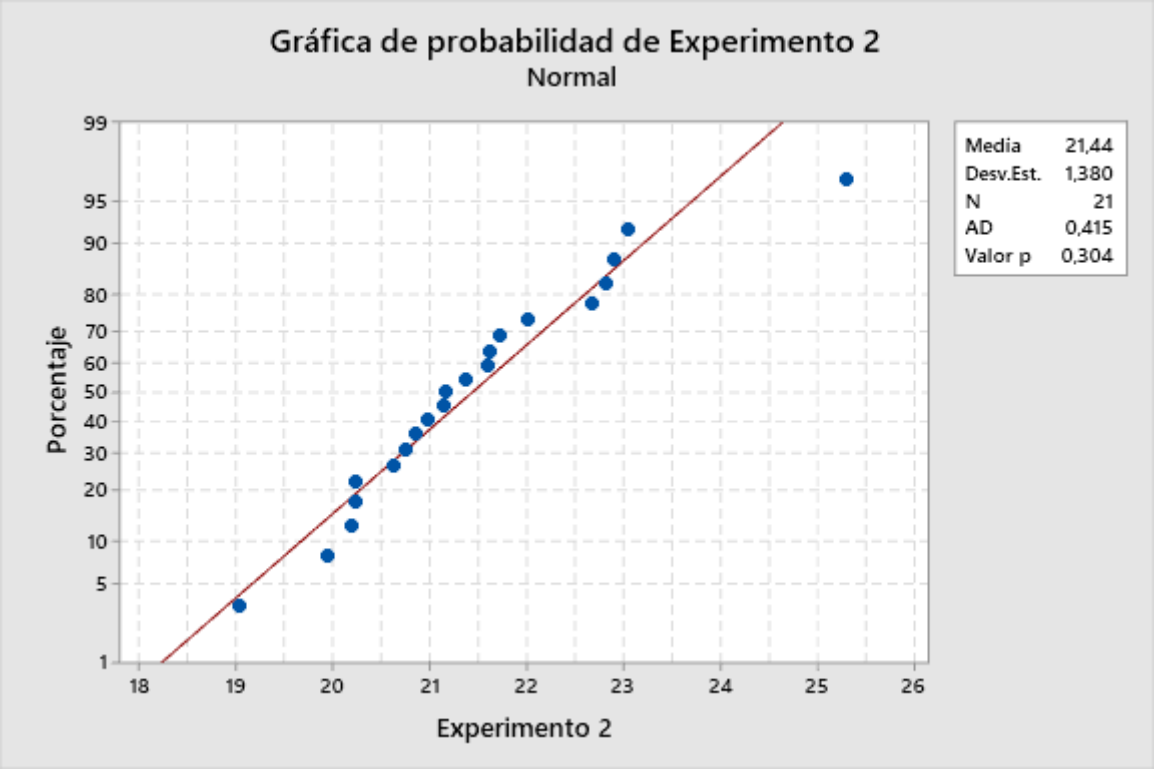
A continuación, se muestran los datos obtenidos de la diferencia de las temperaturas de entrada y salida del radiador de los experimentos 2, 3 y 4:

Tabla 18.
Resumen de la diferencia temperatura de entrada-salida del radiador en los Experimentos 2, 3 y 4

Experimento N° 2	Experimento N° 3	Experimento N° 4
20,85	18,65	15,11
21,72	21,22	16,08
22,67	20,3	16,3
21,59	18,66	16,28
20,23	19,07	15,5
20,18	19,53	15,07
21,37	18,9	14,28
20,22	18,96	14,35
20,63	18,13	16,51
19,03	18,28	15,6
20,97	14,47	13,9
21,16	19,5	16,31
21,14	20,22	14,89
21,62	17,69	16,04
22,02	18,03	13,34
22,82	18,32	14,81
22,9	19,01	14,55
23,06	19,55	13,8
25,31	20,46	14,41
19,95	19,48	16,08
20,75	19,8	15,77

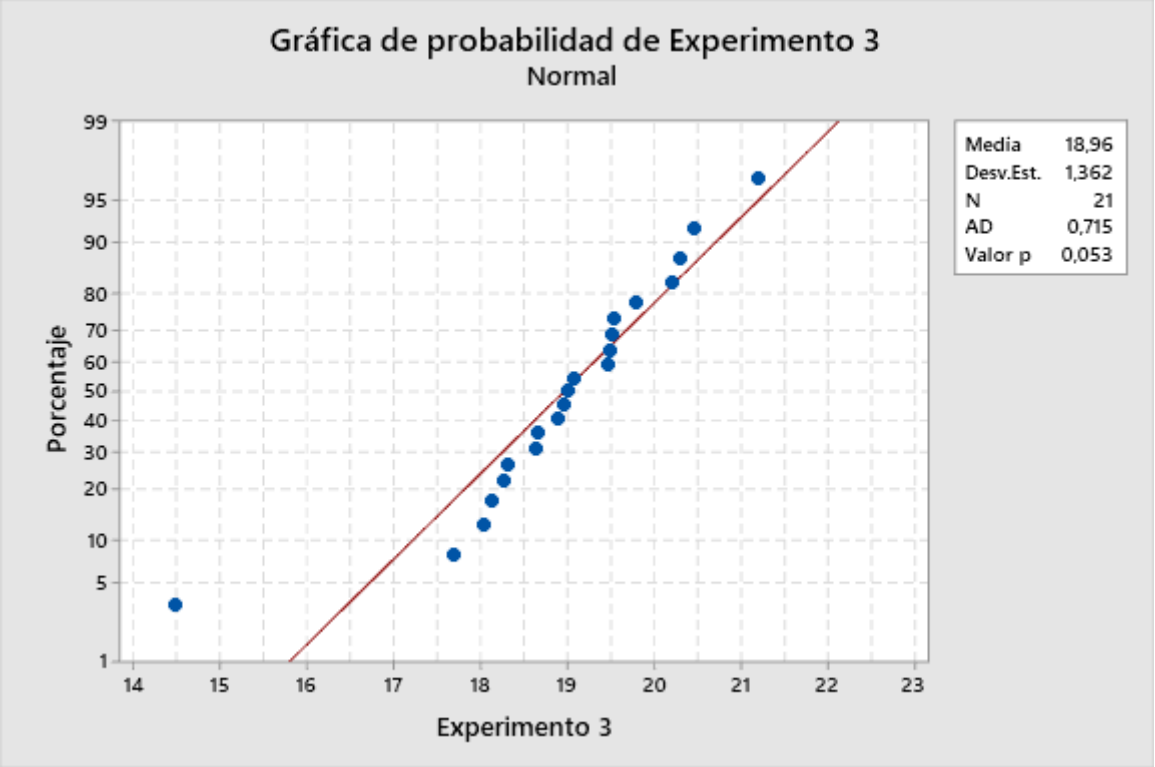
Una vez ingresados individualmente por experimentos al programa MiniTab, se obtiene el siguiente resultado mostrado en las figuras 41,42 y 43.

Figura 41.
Gráfico de prueba de normalidad Experimento 2



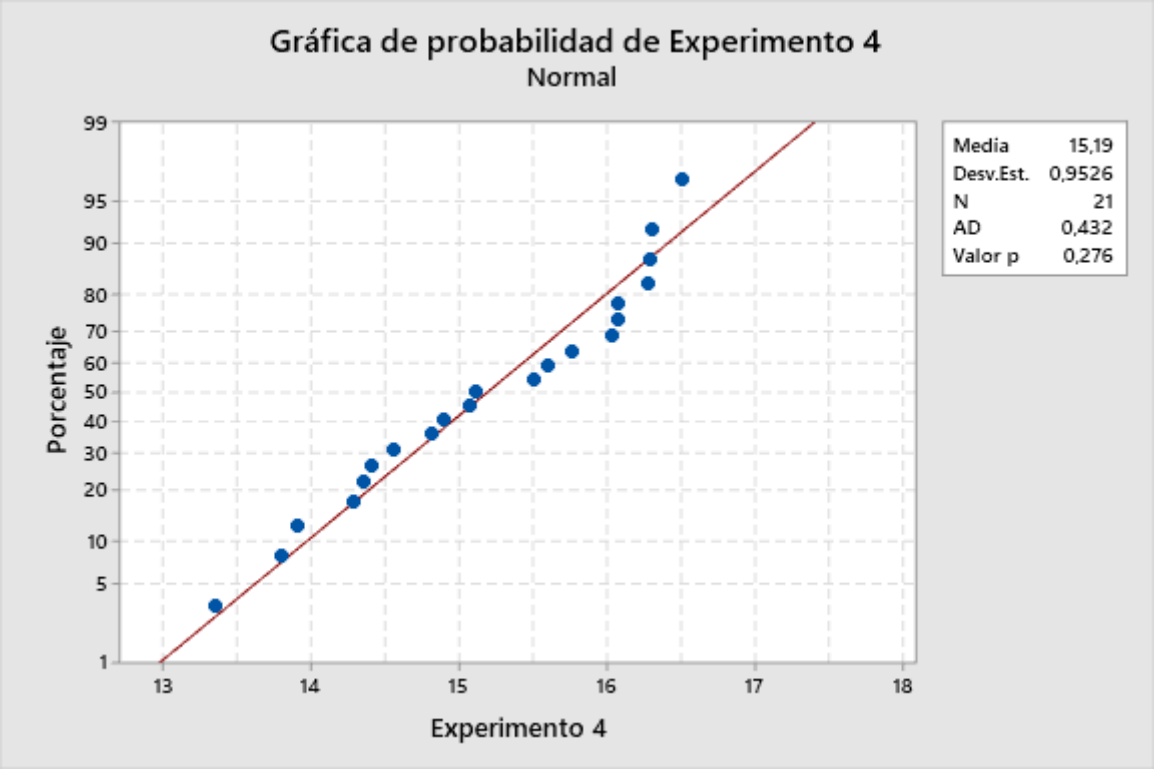
Los puntos de los datos están cerca de la línea de distribución normal ajustada. El valor p es mayor que el nivel de significancia de 0.05. Por lo tanto, no se puede rechazar la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal.

Figura 42.
Gráfico de prueba de normalidad Experimento 3



En este experimento los puntos de los datos también están cerca de la línea de distribución normal ajustada, hay un par de valores lejos que se atribuyen al porcentaje de error de los sensores. El valor de p se observa es mayor que el nivel de significancia de 0.05. Por lo tanto, no se puede rechazar la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal.

Figura 43.
Gráfico de prueba de normalidad Experimento 4



Por último, se observa que el experimento 4 tiene los puntos de los datos cerca de la línea de distribución normal ajustad. El valor de p se observa es mayor que el nivel de significancia de 0.05. Por lo tanto, no se puede rechazar la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal.

Una vez comprobado que los datos siguen una distribución normal se procede a ejecutar el estudio estadístico.

4.3.3.1.2. Tipo de prueba seleccionada

Existe una gran variedad de diseños experimentales que se utilizan para estudiar los problemas o situaciones que pasan día a día, por ese motivo, se debe ser cuidadoso al momento de elegir el correcto para este estudio.

En este caso, se considera el estudio ANOVA, para determinar si la variabilidad del factor, en este caso la temperatura del líquido refrigerante al ingreso genera diferencia en la media de las varianzas y así determinar si afecta al funcionamiento eficiente del radiador el hecho de operar con diferentes temperaturas (18, 20 y 28 °C respectivamente). Además, se implementó un estudio T Pareada para cada uno de los experimentos, se tiene el objetivo de conocer si el intercambio de calor obtenido es eficiente o no, en este caso mayor a 17,5 °C, de ser así se considera que el sistema de refrigeración es efectivo. Para este estudio, se realizaron tres experimentos, mediante el simulador Matlab, se obtuvo el valor de temperatura inicial y final del radiador, manualmente por medio de una sustracción en Excel se obtuvo la diferencia de valores y así contar con los datos de intercambio de calor de cada factor.

Con el diseño de un sistema que permita medir y generar un reporte de la temperatura tanto a la entrada como a la salida del radiador, se logró llevar a cabo el monitoreo a través del *software* implementado Matlab, que almacena la información de la simulación y cuenta con una interfaz que permite observar los datos adquiridos mediante gráficas para un posterior análisis.

En esta tesis, se plantean dos hipótesis: H_1 y H_O, al final del estudio se rechaza o acepta una dependiendo de los resultados del análisis. Se desea almacenar la información para llevar un registro del intercambio de temperatura, lo cual es importante, ya que esta es la variable de interés de la que depende el buen funcionamiento del brazo robótico, el correcto

desempeño, además, ayuda a prevenir futuros fallos relacionados con el sobrecalentamiento. El resultado de las observaciones experimentales se obtiene desde la simulación utilizando el sistema MATLAB, debido a que estos se generan las mediciones simultáneamente durante el experimento, evitando la actividad humana, lo que permite agilizar el tiempo y tener certeza en los datos recogidos. Hipótesis:

- H_O: No hay diferencias entre las medias de los diferentes grupos: Experimento 2 = Experimento 3 = Experimento 4.
- H_1: Al menos un par de medias son significativamente distintas la una de la otra, Experimento 2≠ Experimento 3 ≠ Experimento 4.

Los experimentos consistieron en una simulación controlada durante cinco minutos cada uno, se desea conocer el intercambio de temperatura al inicio y fin del radiador. Se toman en cuenta los datos experimentales de tres factores de temperatura distintos para evaluar su comportamiento durante la ejecución del intercambiador de calor. Además, se utilizan los datos de la tabla 18.

4.3.3.1.3. Ejecución del ANOVA en MiniTab

Con esta tabla se procedió a analizar sus respectivas varianzas, obteniendo como resultado lo siguiente.

Tabla 19.
Datos de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	415,82	207,908	133,71	0,000
Error	60	93,30	1,555		
Total	62	509,11			

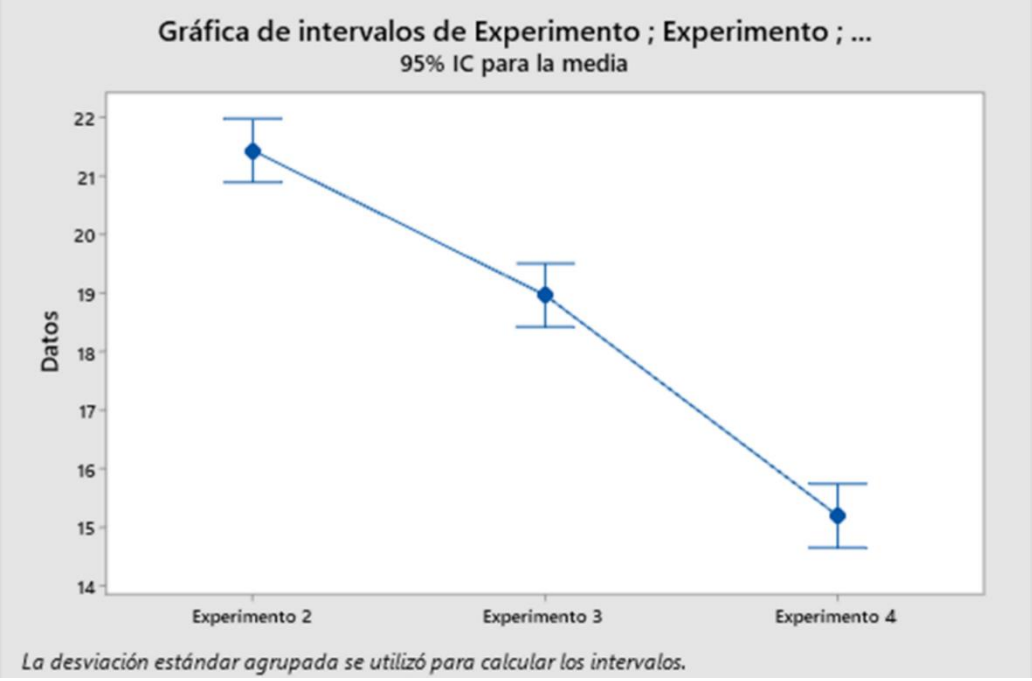
Se aprecia como las diferencias de la media de la varianza son estadísticamente significativas, ya que se observa en el análisis de varianza que el valor de p es 0.000, lo que

significa que es menor al nivel de significancia establecido, por ende, se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que no todas las medias de las varianzas son iguales. Se puede inferir que el motivo por el cual se evidencia una diferencia notable entre las varianzas es el factor temperatura, donde el líquido ingresó con diferentes valores, por ende, sí es un factor que considerar para obtener resultados constantes en el uso del intercambiador de calor.

Se demuestra visualmente que las medias no comparten sus varianzas, acá es importante mencionar que además de la variación en temperaturas de ingreso, 18, 20 y 28 grados centígrados respectivamente se está trabajando con los datos que recolectó el software y estos presentaban un error o ruido de hasta 2 °C según los sensores utilizados.

Seguidamente, esta gráfica de intervalos demuestra que las medias no comparten sus varianzas, a pesar de los tres experimentos haber sido tomadas bajo las mismas condiciones, con esto se debe destacar que esta variación puede ser afectada por los errores o ruido que presentan los sensores.

Figura 44.
Gráfico de intervalos de los experimentos.



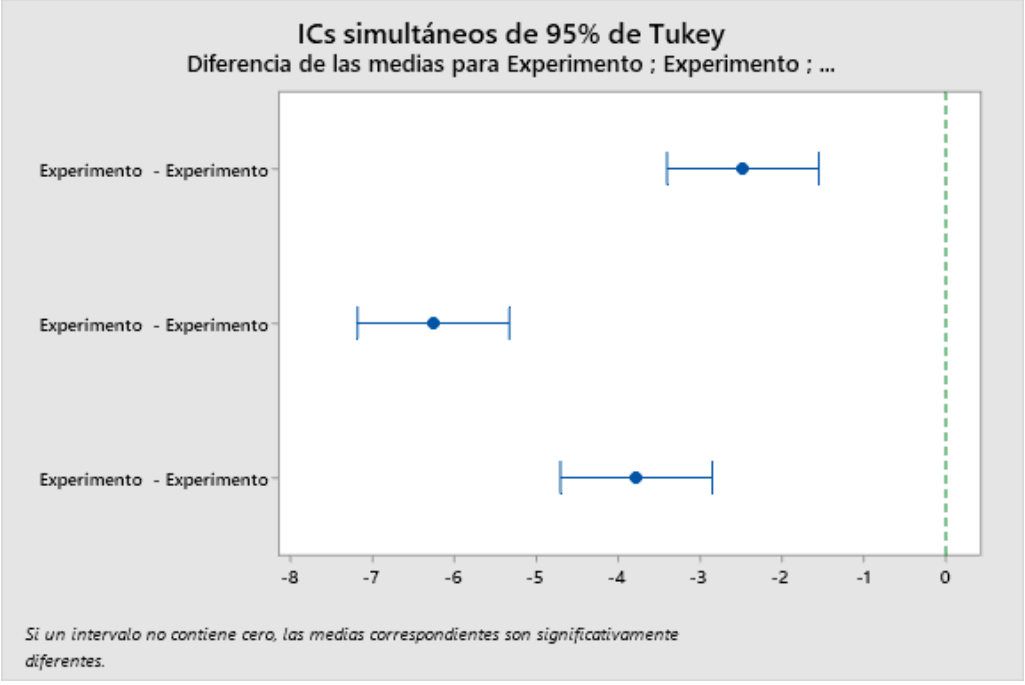
Se utiliza este método para generar intervalos de confianza para todas las diferencias en los pares, entre las medias de los niveles de los factores. En esta tabla, es posible observar la media y la agrupación de los experimentos.

Tabla 20.
Agrupación mediante el método Tukey

Factor	N	Media	Agrupación
Experimento 2	21	21,438	A
Experimento 3	21	18,963	B
Experimento 4	21	15,190	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Para tener un resultado aún más certero, se procede a utilizar el método Tukey y, efectivamente, se muestra que todos los experimentos los ubica con letras diferentes, haciendo constar que no comparten varianzas.

Figura 45.
Gráfico de diferencias de las medias.



Aplicando el método de Tukey, se confirma que las medias de los experimentos no son iguales, mostrando que equivalen grados centígrados.

Tabla 21.
Media de las temperaturas en grados C°

Experimento	Medida
Experimento 2	21,438
Experimento 3	18,963
Experimento 4	15,190

En esta figura se visualiza mejor que sí se obtiene un intercambio de temperatura significativo en cada uno de los casos, pero no de manera constante, se aprecia como el experimento 2 fue el que obtuvo un intercambio mayor de calor, seguidamente por el 3 y por último se refleja el 4, este último fue donde se realizó el experimento con una temperatura inicial del líquido refrigerante de 28 °C, lo que ocasionó que la diferencia entre entrada y salida de temperatura se viera comprometida.

Sin embargo, como se observa un intercambio de calor en cada uno de los casos se procede a estudiar con una T pareada de manera individual los diferentes factores usados, para determinar la eficiencia

T pareada

Según la simulación realizada en computadora se obtuvo que el intercambiador era capaz de producir un intercambio de calor de entre 17 y 18 grados centígrados, por eso se fijó 17,5 °C como el valor objetivo, esto significa que mientras el experimento supere este valor se considera que el sistema de refrigeración fue efectivo, este estudio se realiza con el objetivo de brindar respaldo a los resultados obtenidos en la tabla resumen del análisis Tukey

del ANOVA, también, Es otra manera de demostrar cuales experimentos son aceptables según la cantidad de calor disipado.

Hipótesis:

H_0: diferencia $\mu d = \mu 0$ La media de población de las diferencias (μd) es igual a la media hipotética de las diferencias ($\mu 0$).

H_1: diferencia $\mu > 17,5$ °C La media de población de las diferencias (μd) es mayor que la media hipotética de las diferencias ($\mu 0$).

Ejecución del t pareado en MiniTab

Experimento 2

En este primer experimento se procede a ingresar a Minitab los datos de temperatura de entrada y salida del líquido refrigerante

Tabla 22.
Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Medida	Desv.Est	Error estándar de la media
Entrada	21	40,656	3,211	0,701
Salida	21	19,218	2,854	0,623

Tabla 23.
Estimación de la diferencia pareada

Media	Desv.Est	Error estándar de la media	Límite inferior 95% para la diferencia _μ
21,438	1,380	0,301	20,918

Tabla 24.
Prueba

Valor T	Valor P
13,08	0,000

Hipótesis nula H_0: diferencia_μ = 17,5

Hipótesis alterna H_1: diferencia_μ > 17,5

Experimento 3

Tabla 25.
Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Medida	Desv.Est	Error estándar de la media
Entrada	21	40,462	3,559	0,777
Salida	21	21,499	3,639	0,794

Tabla 26.
Estimación de la diferencia pareada

Media	Desv.Est	Error estándar de la media	Límite inferior 95% para la diferencia _μ
18,963	1,362	0,297	18,454

Tabla 27.
Prueba

Valor T	Valor P
4,92	0,000

Hipótesis nula H_0: diferencia_μ = 17,5

Hipótesis alterna H_1: diferencia_μ > 17,5

La hipótesis nula indica que la diferencia media de los tiempos de carrera es igual a 17,5°C. Puesto que el valor p es 0.000, que es menor que el nivel de significancia de 0.05, se rechaza la hipótesis nula y concluye que hay un intercambio de temperatura mayor a 17,5 °C, el experimento 3 también cumple con el intercambio de calor esperado.

Experimento 4

Tabla 28.
Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Medida	Desv.Est	Error estándar de la media
Entrada	21	41,555	2,528	0,552
Salida	21	26,365	2,647	0,578

Tabla 29.
Estimación de la diferencia pareada

Media	Desv.Est	Error estándar de la media	Límite inferior 95% para la diferencia _μ
15,190	0,953	0,208	14,831

Tabla 30.
Prueba

Valor T	Valor P
-11,11	1,000

Hipótesis nula H_0: diferencia_μ = 17,5
Hipótesis alterna H_1: diferencia_μ > 17,5

La hipótesis nula indica que la diferencia media de los tiempos de carrera es igual a 17,5°C. Puesto que el valor p es 1,000, mayor que el nivel de significancia de 0.05, no se cuenta con suficiente evidencia científica para rechazar la hipótesis nula y concluye que hay un intercambio de temperatura menor a 17,5 °C, por ende el experimento 4 no cumple con el intercambio de calor esperado, concluyendo que en condiciones ideales no se puede esperar un funcionamiento eficiente del radiador si la temperatura de entrada del líquido refrigerante es mayor a 28 °C.

Con este estudio de T pareada, se logró comprobar cuales experimentos, basados en la descripción inicial de cada uno, cuentan con condiciones aceptables para generar un

resultado donde el intercambiador de calor sea eficiente, disipando más de 17, 5 grados centígrados.

4.3.4. Subcategoría: Análisis costo-beneficio

A continuación, se presenta el proceso de análisis costo-beneficio del sistema de refrigeración, se consideraron los costos incurridos para su fabricación, se incluyen todos los costos fijos relacionados con materiales, así como la mano de obra especializada que fue encargada de construir el radiador basado en el diseño previamente expuesto en este documento. Estos costos representan la construcción de una sola unidad de sistema de refrigeración.

4.3.4.1. Definición de costos

Para la determinación de los costos de fabricación del intercambiador de calor, se detallan los siguientes en la tabla 31. Este incluye el total de los costos, es decir, costos directos e indirectos de operación.

Tabla 31.
Costos variables

Tipo	Cantidad	Precio Unitario	Total
Tubo cobre flexible 3/ 8X 15.24 MTRS	1	₡25 010,00	₡25 010,00
Codo de cobre de ¼ X 90 <3/8 >	32	₡890,00	₡28 480,00
Unidad barra soldadura 15% plata de ⅛ x .050X20	3	₡2 860,00	₡8 580,00
Pasta Harris de 4 onzas para soldadura plata	1	₡3 320,00	₡3 320,00
Lámina #22 4x8 Aluminio	1	₡34 500,00	₡34 500,00
Transporte	-	₡5 000	₡5 000
Sensor LM35	7	₡2000	₡14 000
Cables		₡-	₡-
Bomba	1	₡7 000	₡7 000
Aceite	1	₡5 000	₡5 000
Mangueras	1	₡1000	₡2000
Epoxi	1	₡3 500	₡7 000
Total			₡ 139 890

Tabla 32.
Costos fijos

Tipo	Jornada ordinaria	Cantidad de días	Total
Mano de obra especializada/	₡18 205,13	6	₡ 109 230,78
Depreciación Herramientas	₡884 288.0168		₡ 884 288.0168
Total			₡993 518.7968

Tabla 33.
Costos totales

Tipo	Total
Costos Fijos	₡993 518,80
Costos variables	₡139 890,00
Subtotal	₡ 1 133 408,80
Inversión inicial compra de herramientas de taller	₡ 11 053 705,2
Total	₡ 12 187 114

Tabla 34.
Cálculo para la depreciación

Maquinaria	Costo	Vida útil años	Valor residual 20%	Método de depreciación en línea recta *
Taladradora de banco	₡10 649,775.21	10	₡2 129 955,042	₡851 982.0168
Tronzadora	₡138 950	10	₡27 790	₡11 116
Pulidora	₡77 500	10	₡15 599	₡6 190.1
Enderezadora	₡-	10	₡-	-
Máquina de soldar	₡187 500	10	₡37 500	₡15 000
Total	11 053 705.2			₡884 288.0168

Nota. $*MLR = \frac{Costo - Valor\ residual}{Vida\ útil\ en\ años}$

Tabla 35.
Cotización por servicios profesionales para construcción de intercambiador de calor

Elemento	Valor
Materiales	₡ 140 000.00
Mano de obra	₡ 109 230,78
Total	₡ 249 230,798

Tabla 36.
Toma de decisión

Método de Fabricación	Costo Total c/u	Pros	Contras	Método elegido
Cuenta propia	₡ 12 187 114	Se cuenta con el estudio económico en caso de ser una opción viable en el futuro para construir en masa este diseño de intercambiador de calor, de ser así, se podría considerar como opción a largo plazo.	Es excesivamente costoso, considerando que en la etapa temprana solo se necesita la construcción de un prototipo.	
Subcontratación	₡ 249 230,798	Al encontrarse en una etapa temprana de estudio y análisis donde el diseño final aún está propenso a cambios y mejoras, económicamente es más rentable subcontratar los servicios profesionales para la elaboración del intercambiador de calor. Tiempo de respuesta es más ágil, ya que el especialista tiene conocimiento del uso de herramientas y procesos productivos, reduciendo el tiempo de espera para tener el producto final		X

4.3.4.2. Decisión final

En términos de tiempo y margen de error, se opta por subcontratar mano de obra especializada para la elaboración del intercambiador de calor. Esta acción permitió terminar el proyecto de construcción en un periodo corto de una semana, además, al momento de prueba, en funcionamiento con la bomba y el líquido refrigerante, se constató que el porcentaje de error fue mínimo, presentando una fuga muy pequeña de fácil reparación, siendo un resultado positivo para el nivel de detalle y precisión que fueron necesarios para llevar un diseño en planos a la vida real.

4.3.4.4. Basado en costos totales

Del mismo modo, en temas económicos totales, es más rentable recurrir a la subcontratación, ya que representa apenas el 2% del total de la elaboración por cuenta propia, la diferencia es abismal, y se considera que, al ser un proyecto en fase de diseño y mejoras, no merece la inversión.

4.3.4.5. Basado en pros y contras

Temas de tiempo, costos y precisión de la elaboración apuntan a que la mejor opción fue optar por subcontratar los servicios profesionales. Se obtuvo un producto de alta calidad que no solo coincidía con el diseño entregado a la persona encargada, sino que el tiempo de respuesta fue considerablemente corto para ser un proyecto de alta atención a los detalles.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

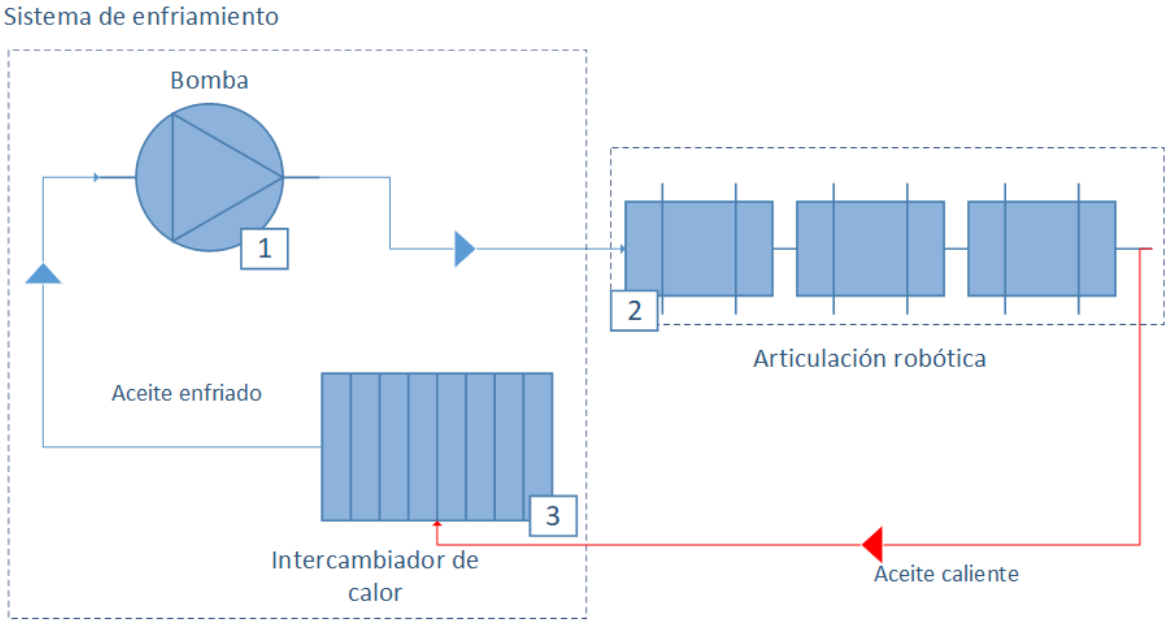
Basado en un estudio de fuentes primarias y secundarias, se logró definir los métodos actuales más relevantes de la refrigeración térmica en motores, máquinas eléctricas y robots humanoides. Además, tomando en consideración los conocimientos técnicos, sumado a los años laborales de los expertos, se compararon los diseños, funcionamientos, problemas y limitaciones de sistemas de refrigeración térmica existentes a nivel nacional e internacional y se concluyó que el primer paso necesario era indagar y aplicar fórmulas que determinan el calor necesario a disipar por el intercambiador de calor, seguidamente, los materiales para la elaboración. Se escogió aluminio y cobre por sus excelentes propiedades de intercambio de calor, tubos de cobre por los que circula el líquido y aluminio para las placas. En cuanto al diseño y posición final, se ubica en el exterior del brazo, ya que se determinó que, por términos de complejidad, de alteraciones mayores al brazo robótico existente y a su potencial daño, un diseño situado al interior representa muchos riesgos, todo esto cumpliendo con las necesidades de extracción de calor del brazo robótico.

Posteriormente, se diseñó en 3D el radiador o intercambiador de calor mediante una simulación de fluidos dinámica computacional, siguiendo parámetros de optimización de masa e intercambio de calor, donde se observó el funcionamiento y se obtuvo el prototipo que cumplió con la necesidad inicial de disipar una cantidad alta de calor.

Con respecto a la conceptualización del sistema de refrigeración, el cual se planteó como un sistema centralizado con bomba, tanque de aceite y el intercambiador calor, después de las pruebas, se determina que el intercambiador siendo utilizado como depósito es eficiente para la cantidad de líquido utilizado; por esa razón, el tanque de aceite no es

necesario, por lo que la configuración del sistema de refrigeración se cambia y lo elimina, quedando como lo muestra la figura 46.

Figura 46.
Diagrama de sistema de enfriamiento después de las pruebas experimentales.



Una vez listo el prototipo en 3D, se procedió a construir el diseño, montar el banco de pruebas y ejecutar el diseño estadístico de experimentos del radiador. Se procedió a realizar las pruebas experimentales para comprobar físicamente los resultados de las simulaciones virtuales. Donde se demostró en las pruebas experimentales que, en ningún momento se apagó el motor, la temperatura se mantuvo estable, por debajo de los 70 grados Celsius como era esperado, el intercambiador de calor fue eficiente para bajar temperaturas muy altas rápido y, aproximadamente, a los 4 minutos del experimento la temperatura comienza a subir, pero no de manera abrupta, esto sin superar los 26 grados Celsius a la salida del intercambiador.

Ahora bien, los análisis ANOVA, Tukey implementados indican que las medias de las varianzas de las pruebas realizadas no son iguales, se infiere que la diferencia de los factores genera que los resultados no sean uniformes, por lo tanto, se debe utilizar determinada temperatura inicial para que el radiador funcione idealmente como lo mostró la simulación en computadora. De manera individual, el estudio T pareada muestra que los experimentos 2 y 3 con factores de temperatura 18 y 20 °C respectivamente sí satisfacen las necesidades del radiador y se obtienen intercambios de calor aceptables, mientras que el experimento 4 con 28 °C de temperatura del aceite no cumple ese supuesto. Se concluye que inyectar un valor superior a este (más de 28°C) no se obtiene un resultado favorable según lo delimitado por las pruebas CDF. En general, estadísticamente hablando se puede concluir que el intercambiador de calor funciona efectivamente en rangos de inyección de aceite inicial de entre 18 y 20 grados centígrados. Además, según las gráficas de temperatura, se puede observar que el intercambiador de calor presentó inicialmente una disminución rápida de calor, posteriormente mantuvo una temperatura estable en los momentos críticos de alza presentados en el experimento, evitando caer en el riesgo de estropear los componentes físicos involucrados.

Adicionalmente, basado en el análisis costo-beneficio, se concluyó que, para el proyecto de materialización del diseño de intercambiador de calor, la subcontratación acarrea mayores beneficios para la etapa en la que se encuentra el proyecto de la Universidad Técnica Nacional, con menores costos y tiempo de acción más eficiente, por lo que se obtiene un producto final de alta calidad con todas las especificaciones técnicas planteadas en el diseño hecho en computadora.

Finalmente, se obtuvo un sistema de enfriamiento líquido para articulaciones robóticas que cumple el objetivo principal de la presente tesis: extraer calor al realizar tareas

de alta demanda energética. Velando en todo momento por el diseño y construcción del prototipo, aplica la metodología del diseño, construcción y análisis de datos de este, adaptando cada uno de los requerimientos para así garantizar que se satisfagan las necesidades planteadas inicialmente.

5.2. Recomendaciones

En lo referente a lo que puede ser un trabajo futuro, es estrictamente necesario subsanar el problema de poder hacerlo aún más ligero y con menor tamaño, para ello se puede intentar imitar sistemas de refrigeración no tan comunes.

Se recomienda estudiar más factores de temperatura, entre 21 y 28 grados para delimitar el límite en el que se obtienen resultados esperados de eficiencia.

REFERENCIAS

Ackerman, E. (13 de octubre de 2016). *This Robot Can Do More Push-Ups Because It Sweats.* IEEE Spectrum. https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/this-robot-can-do-more-pushups-because-it-sweats

American National Standar Institute. (2021). Sitio oficial de la ANSI. Recuperado el 25 de abril de 2022 de https://www.ansi.org/

Asamblea Legislativa de Costa Rica. (2008). *Ley 8638: Ley Orgánica de la Universidad Técnica Nacional* [Alcance 22-A, La Gaceta N.º 107]. UTN. https://www.utn.ac.cr/sites/default/files/attachments/Ley%20Org%C3%A1nica%20de%20la%20Universidad%20T%C3%A9cnica%20Nacional.pdf

AST Ingeniería. (2020). *Simulación CFD.* Recuperado de http://www.ast-ingenieria.com/capacidades-soluciones/simulacion-cfd

Cabrera, F. y Tigre, E. (2016). *Diseño y construcción de los sistemas de refrigeración de un vehículo formula SEA eléctrico* [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador]. Repositorio institucional - Universidad Politécnica Salesiana. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13257/1/UPS-CT006846.pdf

Cengel, Y. y Boles, M. (2014). *Termodinámica* (8a ed.). McGraw Hill.

Cerda, H. (1993). *Los elementos de la investigación.* EL Búho.

Chaves, A. (2004). *Maquinaria y Mecanización Agrícola.* (1ra ed.). EUNED.

Escaño, J., García, J. y Nuevo, A. (2019). *Integración de sistemas de automatización industrial.* (1ra ed.). Paraninfo.

Espinosa, R. (2018). *La matriz de análisis DAFO(FODA).* Recuperado el 25 de abril de 2022 de https://robertoespinosa.es/2013/07/29/la-matriz-de-analisis-dafo-foda

Flores, E., Miranda, M.G. y Vilasís, M.A (2017). El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. Estadística inferencial. *Revista Alergia México, 64(*3). https://doi.org/10.29262/ram.v64i3.304

Galindo, C. (25 de octubre de 2015). Del torno a los robots humanoides La industria está a las puertas de una nueva revolución que transformará la producción. *El País.* https://elpais.com/economia/2015/10/20/actualidad/1445346975_123216.html

García, G. (20 de febrero de 2019). *BMW examina nuevos sistemas de refrigeración para la recarga de vehículos eléctricos.* Híbridos y eléctricos. Recuperado el 25 de abril de 2022 de https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/bmw-examina-nuevos-sistemas-refrigeracion-recarga-vehiculos-electricos/20190220095432025747.html

Gutiérrez, H., y De la Vara, R. (2008). *Análisis y Diseño de experimentos.* Mc-GrawHill.

Hernández, R., Fernández, C., Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación.* McGRAW-HILL.

International Organization for Standardization. (2021). *Sitio oficial de la ISO.* Recuperado el 20 de abril de 2022 de https://www.iso.org/standards.html

Ito, Y., Nozawa, S., Urata, J., Nakaoka, T., Kobayashi, K., Nakanishi, Y., ... y Inaba, M. (2014, May). Development and verification of life-size humanoid with high-output actuation system. In *2014 ieee international conference on robotics and automation (icra)* (pp. 3433-3438). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907353

Jaramillo, O. (2007). *Intercambiadores de calor. Centro de Investigación en Energía*. Universidad Nacional Autónoma de México. http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/HeatExchanger/Intercambiadores.pdf

Kakiuchi, Y., Kojima, K., Kuroiwa, E., Noda, S., Murooka, M., Kumagai, I., ... y Inaba, M. (2015). Development of humanoid robot system for disaster response through team nedo-jsk's approach to darpa robotics challenge finals. In *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)* (pp. 805-810). IEEE. https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2015.7363446

Lessard, M. (20 de diciembre de 2019). *Nueva base de datos ayuda a crear aleaciones de acero innovadoras.* Thermofisher. Recuperado el 27 de abril de 2022 de https://www.thermofisher.com/blog/cienciaacelerada/metales/nueva-base-de-datos-ayuda-a-crear-aleaciones-de-acero-innovadoras/

Lizuain, J. y Muñiz, M. (2018). Innovación de producto y procesos Industriales. *Técnica Industrial, 320,* 68-70. https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/110/6315/a6315.pdf

Lindh, P. M., Petrov, I., Semken, R. S., Niemelä, M., Pyrhönen, J. J., Aarniovuori, L., ... y Kallaste, A. (2016). Direct liquid cooling in low-power electrical machines: Proof-of-concept. *IEEE transactions on energy conversion, 31*(4), 1257-1266. https://doi.org/10.1109/TEC.2016.2597059

MECALUX. (2021). *El brazo robótico industrial toma impulso en el almacén.* Recuperado el 20 de abril de 2022 de https://www.mecalux.com.mx/blog/brazo-robotico-industrial

Mora, P. (10 de mayo de 2019). *ARCOS-Lab de la UCR construye un robot humanoide.* Universidad de Costa Rica. Recuperado el 25 de abril de 2022 de https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/05/10/arcos-lab-de-la-ucr-construye-un-robot-humanoide.html

Mott, R. (2006). *Mecánica de Fluidos* (6ta ed.). PEARSON.

Olmeda, P., Torregosa, A. J., Gautier, E., y Romero, C. A. (2008). Metodología para el análisis de un sistema de refrigeración rediseñado para un motor diesel. *Scientia et technica, 1*(38), 193-198. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4749094

Orozco, J., Ruiz, K., y Corrales, R. (2015). *Manual para la Gestión de la Innovación. Universidad Nacional.* https://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/11477

Ortega, B. (2012). *Análisis Costo Beneficio*. eXtoikos.

Revista de Robots. (4 de septiembre de 2020). *Qué es un robot humanoide. Significado y ejemplos*. Recuperado el 25 de abril de 2022 de https://revistaderobots.com/robots-y-robotica/robots-humanoides/

Rives, N. (2011). *Áreas de mejora en una pyme de alimentos* [tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México, México]. Repositorio institucional. http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/73

Roberts, E. (1996). *Gestión de la innovación tecnológica.* CLÁSICOS COTEC.

Rodríguez, M. (2021). *Diseño y evaluación mediante simulación de una articulación inteligente de alto desempeño para robots humanoides* [Tesis de grado, Universidad de Costa Rica, Costa Rica]. Kerwa. https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/84395?show=full

Rodríguez, M., y Ruiz, F. (2018). Comparative efficiency study of two proposed designs tested in water- and air-cooling conditions for a high-power humanoid robot hollow joint. In *2018 ieee international work conference on bioinspired intelligence (iwobi)* (pp. 1-9). IEEE. https://doi.org/10.1109/IWOBI.2018.8464209

Rojas, O. y Rojas, L. (2006). Diseño asistido por computador. *Industrial Data Revista de investigación. 9*(1), 7-15. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81690102

Romero, C. A., y Carranza, Y. A. (2007). Elementos de diseño de sistemas de enfriamiento de motores de combustión interna. *Scientia et technica, 1*(34). https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84934044

Rossiter, J. (2016). La robótica, los materiales inteligentes y su impacto futuro para la humanidad. En BBVA (Ed.), *El próximo paso: La vida exponencial.* (1ra ed.). BBVA. https://www.bbvaopenmind.com/wp-content/uploads/2017/01/BBVA-OpenMind-libro-El-proximo-paso-vida-exponencial2.pdf

Salazar, F., Cavazos, J. Poch, J., y Santos, F. (2014). Cognición de la Innovación Industrial en América Latina: Avances y Desafíos. *Journal of Technology Management & Innovation. 9*(1), p.148-p.155. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27242014000100012

Tamayo, M. (2003). *El proceso de la investigación científica* (4ta ed.). Editorial LlMUSA, S.A.

Universidad de la República de Uruguay. (2020). *Investigación científica.* http://www.eutm.fmed.edu.uy/paysandu/basicas/met.cientifica/Investigaci%C3%B3n%20Cient%C3%ADfica2020.pdf

Universidad Técnica Nacional. (s.f.a). *Reseña histórica de la universidad técnica nacional.* Recuperado el 27 de abril de 2022 de https://www.utn.ac.cr/content/rese%C3%B1a-hist%C3%B3rica-de-la-universidad-t%C3%A9cnica-nacional

Universidad Técnica Nacional. (s.f.b). *Marco estratégico.* Recuperado el 27 de abril de 2022 de https://www.utn.ac.cr/content/marco-estrat%C3%A9gico

Universidad Técnica Nacional. (s.f.c). *Modelo educativo.* Recuperado el 27 de abril de 2022 de https://www.utn.ac.cr/content/modelo-educativo

Universidad Técnica Nacional. (s.f.d). *Vicerrectoría de investigación y transferencia.* Recuperado el 27 de abril de 2022 de https://www.utn.ac.cr/content/vicerrector%C3%ADa-de-investigaci%C3%B3n-y-transferencia

Zhang, G., Hua, W., Cheng, M., Zhang, B., y Guo, X. (2017). Coupled magnetic-thermal fields analysis of water-cooling flux-switching permanent magnet motors by an axially segmented model. *IEEE Transactions on Magnetics, 53*(6), 1-4. https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2668845

APÉNDICES

Apéndice 1. Guía de Análisis FORD

Los componentes del análisis FODA se usa para tomar la información del funcionamiento, prototipado de piezas en 3D, diseño, problemas y limitaciones, en los diferentes métodos usados en sistemas de refrigeración adaptados a articulaciones robóticas con el fin de definir las estrategias o las conocer las pautas que más se adapten al diseño que se desea.

- Paso 1: Definiendo los riesgos

  ¿Cómo está cambiando el panorama del mundo de la robótica en la industria?

  ¿Alguna debilidad puede ser una amenaza para el trabajo?

  ¿Están cambiando los estándares de diseño del sistema de refrigeración?

  ¿Qué obstáculos estamos enfrentando?

  ¿Cómo nos están afectando las medidas de los otros diseños de intercambiadores de calor en los sistemas de refrigeración?

- Paso 2: Siguen las oportunidades

  ¿Cuáles son las tendencias a favor?

  ¿Qué cambios tecnológicos pueden presentar una oportunidad?

  ¿Qué deberíamos hacer que no hayamos hecho y ellos sí?

  ¿Existe alguna fortaleza que podamos explotar?

- Paso 3: ¿Cuáles son mis fortalezas?

  ¿En qué somos mejores?

  ¿Cuáles son las ventajas de nuestro sistema de refrigeración?

  ¿Cuáles son los factores que nos hacen merecedores de esa oportunidad?

  ¿Cuál es nuestra propuesta de valor?

  ¿Qué puntos fuertes tiene nuestra investigación?

- Paso 4: Detectando las debilidades

  ¿En qué podemos mejorar?

  ¿Qué deberíamos dejar de hacer?

  ¿Qué aspectos negativos presenta nuestra investigación?

  ¿En qué nos falta más experiencia?

- Paso 5: Definiendo las estrategias

Las estrategias se trazan comparando fortalezas, oportunidades, riesgos y debilidades, basados en:

  - ¿De qué forma podemos usar nuestras fortalezas para aprovechar nuestras oportunidades?
  - ¿Cómo se pueden usar nuestras fortalezas para mitigar los riesgos?
  - ¿Cómo podemos aprovechar las oportunidades para corregir nuestras debilidades?
  - ¿Cómo podemos mantenernos en pie aun con los riesgos vistos?

Apéndice 2. Guía de entrevista a profundidad

ENTREVISTA A PROFUNDIDAD

Presentación: Como parte de una investigación en el 2021 para la Licenciatura en Ingeniería en Producción Industrial de la Universidad Técnica Nacional (UTN), se desarrolló la siguiente investigación sobre: Análisis de un sistema de enfriamiento líquido moderno para articulaciones robóticas mediante un estudio dinámico computarizado en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional, durante el periodo 2021.

La presente entrevista se elaboró con el objetivo de definir los métodos actuales más relevantes de la refrigeración térmica en motores, máquinas eléctricas y robots humanoides, mediante un estudio comparativo de diseños, funcionamiento, problemas y limitaciones en sistemas de refrigeración térmica existentes a nivel nacional e internacional, con el fin de conocer las pautas que más se adapten al diseño que se desea.

I. Información general

Entrevista a profundidad	
Nombre de la persona entrevistada:	
Institución /Organización:	
Fecha:	Lugar:

II. Sistemas de enfriamiento

Temas	Preguntas
1. Sistemas de refrigeración	¿Cuáles sistemas de refrigeración ha conocido? Mencione su estructura. ¿Cuál considera más eficiente? ¿Cuáles problemas o limitaciones, considera que tienen esos sistemas de refrigeración? ¿Qué métodos conoce para reducir el consumo energético y convertir el proceso más eficiente en los sistemas de refrigeración?
2. Comportamiento térmico de los sistemas de refrigeración	¿Cuál es el comportamiento térmico de los sistemas de refrigeración que conoce? ¿Cómo afecta este comportamiento térmico a los materiales que lo conforman? ¿En qué afecta el comportamiento térmico en la eficiencia del sistema?
3. Intercambiadores de calor	¿Qué intercambiadores de calor conoce? ¿Cuál considera más eficiente? ¿Cómo es su estructura? ¿Cuál es su funcionamiento? ¿Cuáles son sus deficiencias o problemas?
4. Métodos actuales	¿Qué problemáticas actuales considera que tienen los sistemas de refrigeración? ¿Está familiarizado con sistemas de refrigeración novedosos en el mundo? ¿Está familiarizado con Intercambiadores de calor novedosos en el mundo? ¿Considera que son más eficientes los métodos actuales que los pasados? ¿Por qué?

III. Análisis de datos

Temas	Preguntas
1. *Softwares* estadísticos	¿Cuáles *softwares* estadísticos conoce? ¿Cuál considera más eficiente? ¿Cuál recomienda para realización de proyecto de análisis de datos?
2. Diseño de experimentos	¿Cuáles pautas considera se debe seguir para realizar un diseño de experimentos eficiente? ¿En su experiencia cuáles recomendaciones nos brindaría para realizar el diseño de experimentos?
3. Análisis estadístico	¿Cuáles pasos considera se debe seguir para realizar un buen análisis estadístico? ¿En su experiencia cuáles recomendaciones nos brindaría para realizar el análisis estadístico

IV. Articulaciones robóticas

Temas	Preguntas
1. Modelos actuales de articulaciones robóticas	¿Cuáles modelos de articulaciones robóticas conoce? ¿Cuál considera más eficiente? ¿Cuál considera es su problemática?
2. Consumo de energía de las articulaciones robóticas actuales	¿Cuáles son las principales deficiencias en lo que se refiere a consumo energético en articulaciones robóticas? Bajo su conocimiento, ¿Cuáles mecanismos de ahorro energético conoce? ¿Cuáles actividades representan mayor consumo energético en las articulaciones robóticas?
3. Diseño de articulaciones robóticas	¿cuáles son las características que tienen los brazos robóticos? ¿Conoce de sistemas de refrigeración en articulaciones robóticas, de ser así, cuáles, cómo son, qué tan eficientes son, cuáles son sus problemáticas?

Apéndice 3. Guía para el diseño, simulación, mecanizado CAD.

Para el diseño y simulación digital, se utilizó el *software* CAD SOLIDWORKS® que es una aplicación de automatización de diseño mecánico que permite diseñar, realizar croquis e ideas con rapidez. También permite experimentar con operaciones y cotas, así como producir modelos y dibujos detallados. Otra característica de este *software* es que permite diseñar piezas de todos los tamaños que ensamblan entre sí.

Este *software* de fácil uso y aprendizaje brinda la ventaja de que se disminuya la dificultad en la creación de piezas.

Las siguientes tareas representan la parte de diseño en CAD SOLIDWORKS®:

- Estudio del diseño del sistema de refrigeración
- Estudio y selección de materiales (piezas) necesarios para el ensamble del sistema.
- Modelado 3D intercambiador de calor.
- Ensamble del sistema de intercambiador de calor.
- Revisión del modelo 3D.
- Impresión en 3D.

Por otra parte, el *software* también permitió la simulación dinámica de fluidos que se le aplicó al sistema de refrigeración previamente diseñado; se ve representado con las siguientes tareas:

- Simulación del sistema de refrigeración como un todo.
- Simulación digital del intercambiador de calor.
- Simulación en físico, con las piezas impresas en 3D.

Apéndice 4. Guía para el diagrama de flujo de proceso.

Para determinar los pasos a seguir o los procesos de diseño del sistema de enfriamiento, se utiliza un diagrama de flujo, que es la representación gráfica de flujo de un proceso o de una secuencia de actividades rutinarias. En el cual se utilización diversos símbolos para representar las operaciones o actividades específicas del proceso, las actividades representadas por símbolos se conectan por medio de flechas para indicar la secuencia de la operación.

Esto con el fin de obtener una comprensión más fácil del proceso de realización del diseño del sistema de enfriamiento, así como el proceso de construcción del prototipo, además de que permite representar un proceso para realizar los respectivos análisis.

A continuación, se debe escoger el tipo de diagrama que más se adecue al proceso, el cual es el diagrama de flujo de bloques.

En el diagrama de flujo bloques, la secuencia de información se presenta a través de una secuencia de bloques encadenados entre sí, cada cual con su significado. Es una forma sencilla de representar un proceso que muestran paso a paso el desarrollo de este.

La simbología por usar son las del Instituto Nacional de Normalización Estadounidense (ANSI, por sus siglas en inglés) para el proceso de diseño 3D y simulación CFD. La simbología para que se emplea es en diagramas orientados al procesamiento digitales, la simbología se representa en la siguiente imagen.

Figura A4.1.
Simbología ANSI.

Simbolo	Significado	¿Para que se utiliza?
	Inicio / Fin	Indica el inicio y el final del diagrama de flujo.
	Operación / Actividad	Simbolo de proceso, representa la realización de una operación o actividad relativas a un procedimiento.
	Documento	Representa cualquier tipo de documento que entra, se utilice, se genere o salga del procedimiento.
	Datos	Indica la salida y entrada de datos.
	Almacenamiento / Archivo	Indica el depósito permanente de un documento o información dentro de un archivo.
	Decisión	Indica un punto dentro del flujo en que son posibles varios caminos alternativos.

Simbolo	Significado	¿Para que se utiliza?
	Líneas de flujo	Conecta los simbolos señalando el orden en que se deben realizar las distintas operaciones.
	Conector	Conector dentro de página. Representa la continuidad del diagrama dentro de la misma página. Enlaza dos pasos no consecutivos en una misma página.
	Conector de página	Representa la continuidad del diagrama en otra página. Representa una conexión o enlace con otra hoja diferente en la que continua el diagrama de flujo.

Nota. Tomado de la P*ágina Web de la ANSI,* 2021 (https://www.ansi.org/).

Para el proceso de fabricación del sistema de enfriamiento, se utiliza la simbología de la Organización Internacional para la Normalización (ISO por sus siglas en inglés), esta simbología esta más orientada la producción de bienes, se representa en la siguiente imagen.

Figura A4.2.
Simbología ISO.

Símbolo	Significado	¿Para que se utiliza?
	Operación	Indica las principales fases del proceso, método o procedimiento.
	Operación e Inspección	Indica la verificación o supervisión durante las fases del proceso, método o procedimiento de sus componentes.
	Inspección y Medición	Representa el hecho de verificar la naturaleza, cantidad y calidad de los insumos y productos.
	Transporte	Indica cada vez que un documento se mueve o traslada a otra oficina y/o funcionario.
	Entrada de bienes	Indica productos o materiales que ingresan al proceso.
	Almacenamiento	Indica el depósito permanente de un documento o información dentro de un archivo.

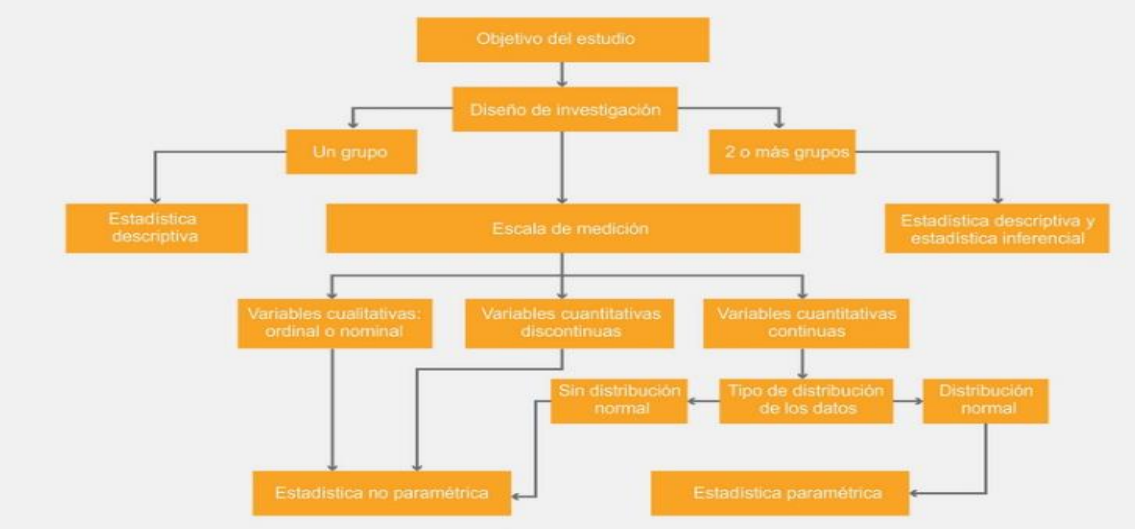
Símbolo	Significado	¿Para que se utiliza?
Si/No Si/No	Decisión	Indica un punto dentro del flujo en que son posibles varios caminos alternativos.
	Líneas de flujo	Conecta los símbolos señalando el orden en que se deben realizar las distintas operaciones.
	Demora	Indica cuando un documento o el proceso se encuentra detenido, ya que se requiere la ejecución de otra operación o el tiempo de respuesta es lento.
	Conector	Conector dentro de página. Representa la continuidad del diagrama dentro de la misma página. Enlaza dos pasos no consecutivos en una misma página.
	Conector de página	Representa la continuidad del diagrama en otra pagina. Representa una conexión o enlace con otra hoja diferente en la que continua el diagrama de fluio.

Nota. Tomado de la P*ágina Web de la ANSI*, 2021 (https://www.ansi.org/).

Apéndice 5. Guía para el diseño estadístico de experimentos.

Según el libro *Análisis y Diseño de experimentos,* el objetivo de los métodos estadísticos es lograr que el proceso de generar conocimiento y aprendizaje sea lo más eficiente posible, por medio de pruebas planeadas adecuadamente. Esta metodología se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permiten entender mejor, situaciones complejas de relación causa-efecto (Gutiérrez, De la Vara, 2008. p, 6-p, 7). En este diseño estadístico, se utilizó la herramienta Minitab®, este *software* cuenta con herramientas precisas y fáciles de utilizar, para acceder a un análisis e interpretación de datos. A continuación, se explicará el proceso para definir la elección de la prueba estadística por aplicar, para ello se deben definir algunos aspectos que se ilustran en la figura que se muestra:

Figura A5.1.
Proceso de selección de una prueba estadística.



Nota. El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. Estadística inferencial, 2017, *Revista Alergia México*, *64*(3). (https://doi.org/10.29262/ram.v64i3.304)

Primeramente, se debe seleccionar el tipo de estadística por utilizar, esto se hace definiendo el número de mediciones que se considerarán durante el experimento. Es necesario diferenciar la naturaleza de los datos que se obtienen, ya que se dividen en dos tipos: cuantitativos y cualitativos. Se debe tomar en cuenta que las variables cuantitativas se clasifican en cuantitativas continuas, por ejemplo, peso, longitud, volumen. Por otra parte, las cuantitativas discontinuas son aquellas que no se pueden dividir, por ejemplo, se pueden mencionar los embarazos y número de hijos. Asimismo, las cualitativas se clasifican en nominales y ordinales, este primer grupo se caracteriza porque hay muy pocas diferencias entre una y la otra, por ejemplo, el estado civil, es soltero, casado o se encuentra en unión libre. El segundo grupo se les conoce como cualitativas ordinales, entre estos se puede ilustrar con la gravedad de una enfermedad, si se encuentra grave, moderado o leve.

El paso posterior es determinar el tipo de estadística a utilizar (ver figura A5.1), estas pueden ser Estadística Paramétrica o Estadística no Paramétrica, para encontrar cuál es la clasificación que mejor se adapta con los datos que se tengan, primero se debe realizar una prueba de normalidad, esta determina si los datos son normales o no. Si lo son, se pueden utilizar experimentos del tipo de estadística paramétrica o, por el contrario, no siguen una distribución normal, se debe indagar en los experimentos de tipo Estadística no Paramétrica.

En el siguiente cuadro (ver figura A5.2) resumen, se muestra un listado de pruebas recomendadas según las características propias descritas anteriormente.

Figura A5.2.
Prueba estadística de acuerdo con los objetivos del estudio y la escala de medición de las variables.

Objetivos del estudio	Variables y distribución	Tipo de muestra	Prueba recomendada
Comparar 2 promedios	Cuantitativas, distribución normal	Muestras relacionadas Muestras independientes	t de Student t de Student
	Cuantitativas discontinuas y continuas sin distribución normal	Muestras relacionadas Muestras independientes	Wilcoxon U Mann Whitney
Comparar ≥ 3 grupos	Cuantitativas, distribución normal	Muestras relacionadas Muestras independientes	Análisis de varianza (ANOVA) de 2 vías ANOVA de una vía
	Cuantitativas discontinuas y continuas sin distribución normal	Muestras relacionadas Muestras independientes	Friedman Kruskal-Wallis
Comparar 2 grupos	Cualitativas nominales y ordinales	Muestras relacionadas Muestras independientes	McNemar Chi-cuadrada*
Comparar ≥ 3 grupos	Cualitativas nominales y ordinales	Muestras relacionadas Muestras independientes	Q de Co chran Chi cuadrada
Correlación de 2 variables	Cuantitativas, distribución normal	Muestras independientes	Coeficiente de correlación de Pearson
	Cuantitativas discontinuas y continuas sin distribución normal	Muestras independientes	Coeficiente de correlación de Spearman

Nota. El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. Estadística inferencial, 2017, *Revista Alergia México*, *64*(3). (https://doi.org/10.29262/ram.v64i3.304)

Apéndice 6. Guía para el análisis costo-beneficio

El análisis costo-beneficio se utiliza como herramienta de toma de decisión, para determinar si el proyecto por sí mismo es conveniente en términos monetarios. Para conocer la rentabilidad planteada en un proyecto, se deben tomar en cuenta diferentes variables, entre ellas se pueden destacar las siguientes:

- Coste de la producción.
- Alquiler del lugar
- Suministros (insumos o materias primas necesarios para el proceso de producción).
- Empleados.
- Impuestos.
- Pago de seguros de responsabilidad civil.
- Cotizaciones a la seguridad social de los empleados.
- Precio final del bien producido y margen de beneficio unitario.
- Nivel de producción óptimo.
- Volumen de ventas.
- Provisiones por depreciación del bien o servicio.

Además de estos costos fijos y variables, se debe tomar en cuenta la rentabilidad social, según Ortega (2012). El análisis coste-beneficio tiene por objetivo determinar si el proyecto es deseable desde el punto de vista del bienestar social y, si lo es, en qué medida. Esta metodología muestra, además, quién gana y quién pierde (y por cuánto) como resultado de la ejecución del proyecto y si es socialmente deseable (Ortega, 2012, p. 1).

Para llevar a cabo este análisis Costo-Beneficio, primero se procede a realizar la comparación entre el escenario de fabricación del intercambiador de calor por cuenta propia,

así como el de subcontratar los de servicios profesionales de un taller. En el análisis de costos por cuenta propia se toman en cuenta todos los costos fijos y variables necesarios para su elaboración, se ilustra como ejemplo la siguiente tabla:

Tabla A6.1
Costos variables

Tipo	Cantidad	Precio Unitario	Total
Total			₡

Tabla A6.2.
Costos fijos

Tipo	Jornada ordinaria	Cantidad de días	Total
Mano de obra especializada/	₡		₡
Depreciación Herramientas	₡		₡
Total			₡

Tabla A6.3.
Costos de herramientas

Maquinaria	Cantidad	Costo
Total		₡

Por otra parte, para conocer los costos de subcontratación, es necesario realizar la cotización al taller con el diseño del intercambiador de calor, se brindan las especificaciones técnicas al constructor para que así pueda brindar un costo total y también el tiempo aproximado que puede tardar en tener lista la pieza solicitada.

Tabla A6.4.
Cotización por servicios profesionales para construcción de intercambiador de calor

Elemento	Valor
Materiales	₡
Mano de obra	₡
Total	₡

Por último, se procede a comparar ambos montos totales de la mano con un análisis de pros y contras de cada uno y así tomar una decisión de cuál es más rentable para este proyecto en específico.

Tabla A6.5.
Tabla toma de decisión

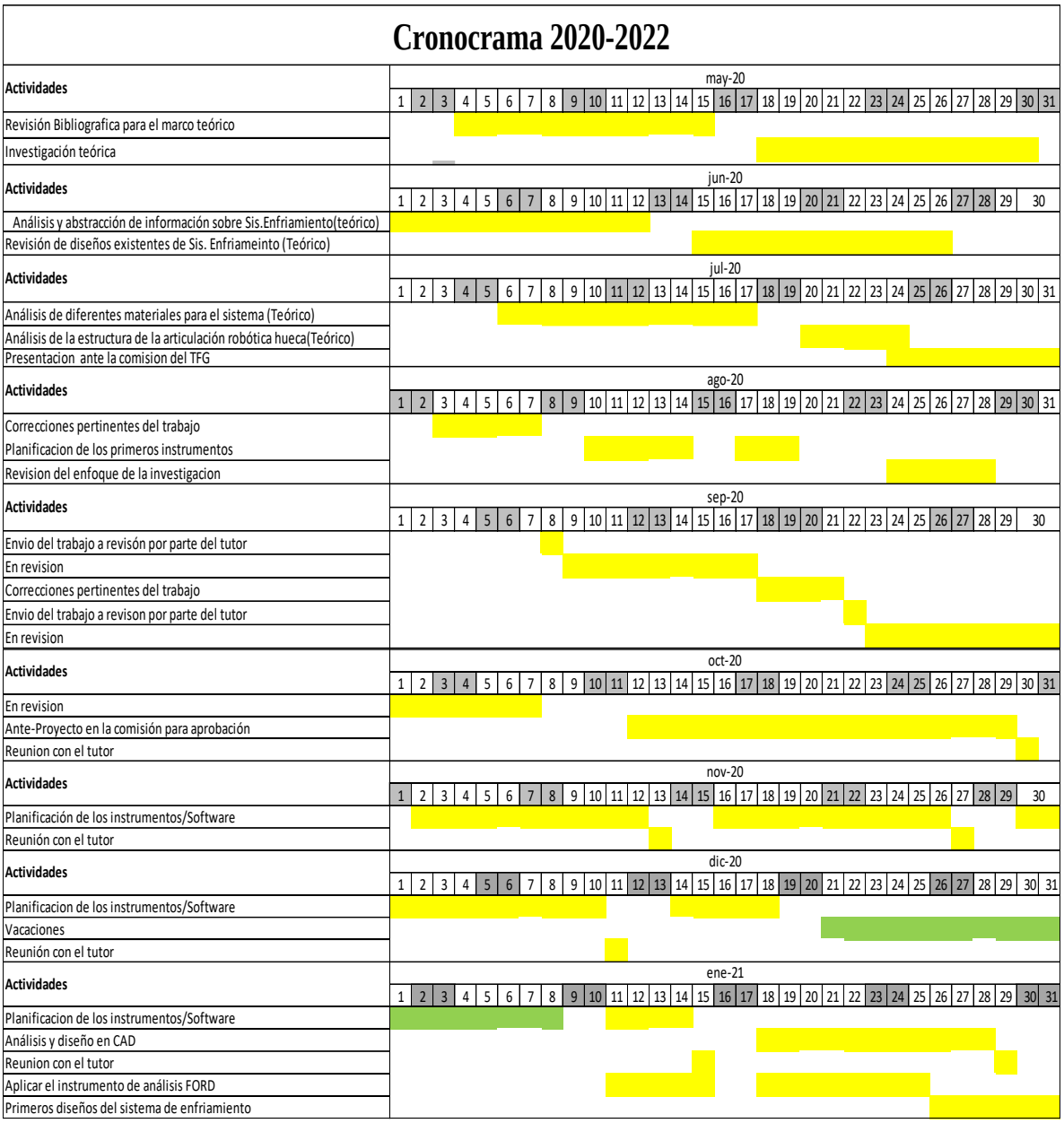
Método de Fabricación	Costo Total c/u	Pros	Contras	Método elegido
Cuenta propia	₡			
Subcontratación	₡			

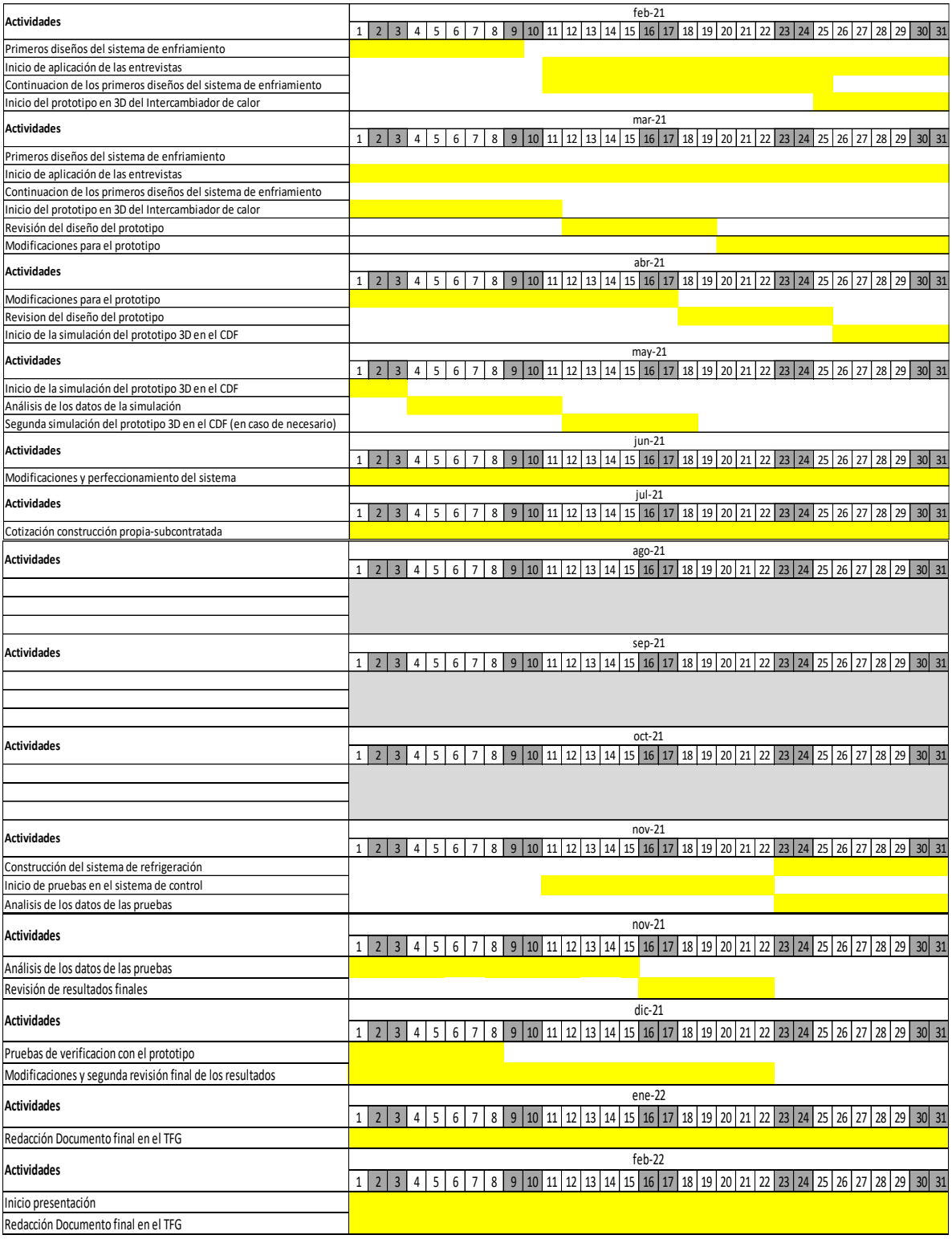
Decisión final

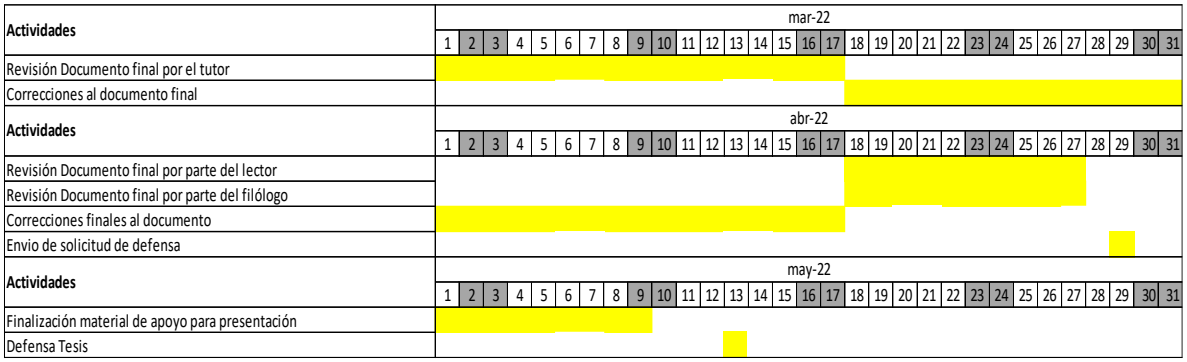
Basado en costos totales

Basado en pros y contras

Apéndice 7. Cronograma




Actividades
feb-21
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Primeros diseños del sistema de enfriamiento
Inicio de aplicación de las entrevistas
Continuacion de los primeros diseños del sistema de enfriamiento
Inicio del prototipo en 3D del Intercambiador de calor
Actividades
mar-21
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Primeros diseños del sistema de enfriamiento
Inicio de aplicación de las entrevistas
Continuacion de los primeros diseños del sistema de enfriamiento
Inicio del prototipo en 3D del Intercambiador de calor
Revisión del diseño del prototipo
Modificaciones para el prototipo
Actividades
abr-21
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Modificaciones para el prototipo
Revision del diseño del prototipo
Inicio de la simulación del prototipo 3D en el CDF
Actividades
may-21
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Inicio de la simulación del prototipo 3D en el CDF
Análisis de los datos de la simulación
Segunda simulación del prototipo 3D en el CDF (en caso de necesario)
Actividades
jun-21
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Modificaciones y perfeccionamiento del sistema
Actividades
jul-21
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Cotización construcción propia-subcontratada
Actividades
ago-21
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Actividades
sep-21
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Actividades
oct-21
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Actividades
nov-21
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Construcción del sistema de refrigeración
Inicio de pruebas en el sistema de control
Analisis de los datos de las pruebas
Actividades
nov-21
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Análisis de los datos de las pruebas
Revisión de resultados finales
Actividades
dic-21
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Pruebas de verificacion con el prototipo
Modificaciones y segunda revisión final de los resultados
Actividades
ene-22
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Redacción Documento final en el TFG
Actividades
feb-22
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Inicio presentación
Redacción Documento final en el TFG


Actividades
mar-22
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Revisión Documento final por el tutor
Correcciones al documento final
Actividades
abr-22
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Revisión Documento final por parte del lector
Revisión Documento final por parte del filólogo
Correcciones finales al documento
Envio de solicitud de defensa
Actividades
may-22
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31
Finalización material de apoyo para presentación
Defensa Tesis

ANEXOS

Anexo 1: Carta de aval del tutor

Fecha:

Señores
Comisión de Trabajos Finales de Graduación
Dirección de carrera
Licenciatura en Ingeniería en producción Industrial
Sede Central

Estimados señores:

Asunto: otorgamiento de aval para presentación de anteproyecto

Yo, Mauricio Rodríguez Clavo, en calidad de tutor, portador de la cédula número _____(), doy mi aval para la presentación de la propuesta del tema tesis denominado: "Análisis de un sistema de enfriamiento líquido para articulaciones robóticas mediante un estudio dinámico computarizado en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional, durante el periodo 2021*"* ante la Comisión de Trabajos Finales de Graduación para su revisión y evaluación.

Con este requisito, se pretende que los aprendientes: María Fernanda Madriz Ramírez, cédula numero dos cero siete seis dos cero siete cinco cuatro (207620754) y Kevin Alberto Solano Núñez, cédula número dos cero siete seis tres cero tres nueve ocho (207630398), realicen una investigación que beneficie el aprendizaje y la formación profesional y personal en el área.

Atentamente,

_____

Máster Mauricio Rodríguez Calvo
mrodriguezc@utn.ac.cr
Docente e Investigador UTN
Tutor

Anexo 2. Carta de validación de instrumentos por expertos

Fecha:

Señores
Comisión de Trabajos Finales de Graduación
Dirección de carrera
Licenciatura en Ingeniería en producción Industrial
Sede Central

Estimados señores:

Por este medio, hago constatar que yo, Mauricio Rodríguez Calvo ,identificación, cédula N° 206640982 ; he servido como validador(a) para recolectar la información del proyecto final de graduación titulado: Análisis de un sistema de enfriamiento líquido moderno para articulaciones robóticas mediante un estudio dinámico computarizado en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional, durante el periodo 2021, pertenecientes a los estudiantes: María Fernanda Madriz Ramírez, identificación: 207620754 y Kevin Alberto Solano Núñez, identificación: 207630398

Así doy fe que: el análisis FORD, la entrevista a profundidad, el *software* de diseño, simulación, mecanizado CAD, el *software* de diseño de estadístico de experimentos y el sistema de control de datos (instrumentos) responden a los objetivos variables/categorías de análisis planeación en la investigación y que, además, los estudiantes incorporaron satisfactoriamente todas las observaciones y sugerencias hechas en el proceso de validación.

Cordialmente,

_____

Máster Mauricio Rodríguez Calvo
mrodriguezc@utn.ac.cr
Docente e Investigador UTN

Anexo 3. Carta aval profesor del curso IPRI-1414 Investigación dirigida

Fecha:

Señores
Comisión de Trabajos Finales de Graduación
Dirección de carrera
Licenciatura en Ingeniería en Producción Industrial
Sede Central

Estimados señores:

Asunto: otorgamiento de aval para presentación de anteproyecto

Yo, David Quesada García, en calidad de profesor del curso Investigación dirigida IPRI-1414, portador de la cedula número uno uno cuatro tres tres cero tres siete tres (1 1433 0373), doy mi aval para la presentación de la propuesta del tema proyecto/tesis denominado: "Análisis de un sistema de enfriamiento líquido para articulaciones robóticas mediante un estudio dinámico computarizado en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional durante el periodo 2021" ante la Comisión de Trabajos Finales de Graduación para su revisión y evaluación.

Con este requisito, se pretende que las y los aprendientes: María Fernanda Madriz Ramírez, cédula numero dos cero siete seis dos cero siete cinco cuatro (207620754) y Kevin Alberto Solano Núñez, cédula número dos cero siete seis tres cero tres nueve ocho (207630398), realicen una investigación que beneficie el aprendizaje y la formación profesional y personal en el área.

Atentamente,

_____

David Quesada García
dquesadag@utn.ac.cr
Profesor IPRI Investigación dirigida

Anexo 4. Carta de revisión filológica

San José, 28 de abril de 2022

Señores(as):
Universidad Técnica Nacional

Estimados señores(as):

Yo, María Fernanda Sanabria Coto, cédula de identidad 114290780, bachiller en Filología española graduada en la Universidad de Costa Rica, perteneciente a la Asociación Costarricense de Filólogos (ACFIL), carné 225 y al Colegio de Licenciados y Profesores en Letras, Filosofía, Ciencias y Artes de Costa Rica (COLYPRO), código 75402, hago constar que he revisado el documento titulado:

Análisis de un sistema de enfriamiento líquido para articulaciones robóticas mediante un estudio dinámico de fluido computarizado en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional, durante el periodo 2020-2022

Dicho documento fue elaborado por María Fernanda Madriz Ramírez, cédula de identidad 207620754 y Kevin Alberto Solano Núñez, cédula de identidad 207630398, con el fin de optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Producción Industrial. He revisado y corregido aspectos tales como construcción de párrafos, vicios del lenguaje trasladados a lo escrito, ortografía, puntuación y otros relacionados con el campo filológico.

Atentamente,

Fernanda S. Coto

María Fernanda Sanabria Coto
Asociación Costarricense de Filólogos. Carné nro. 225
Colypro. Código 75402
fernanda.sanabria@filologos.cr
Teléfono: +506 6022 9569

MARIA FERNANDA SANABRIA COTO (FIRMA)
Firmado digitalmente por MARIA FERNANDA SANABRIA COTO (FIRMA)
Motivo: Carta de revisión filológica
Fecha: 2022.04.28 18:18:35 -06'00'

Anexo 5. Declaración Jurada

DECLARACIÓN JURADA

Nosotros, María Fernanda Madriz Ramírez, portadora de la cédula de identidad número 2 0762 0754 y Kevin Alberto Solano Núñez, portador de la cédula de identidad número 2 0763 0398, estudiantes de la Universidad Técnica Nacional (UTN) en la carrera de Ingeniería en Producción Industrial, conocedores de las sanciones legales con que la Ley Penal de la República de Costa Rica castiga el falso testimonio y el delito de perjurio que pueda ocasionarse ante el(la) director(a) de carrera y quienes constituyen el Tribunal Examinador de este trabajo de investigación, juramos solemnemente que este trabajo de investigación es una obra original que respeta las leyes y que ha sido elaborada siguiendo las disposiciones exigidas por la Universidad Técnica Nacional (UTN), así como con los derechos de autor.

En fe de lo anterior, firmamos en la ciudad de Atenas, a los (día de la fecha) días del mes de (mes del año) del (año).

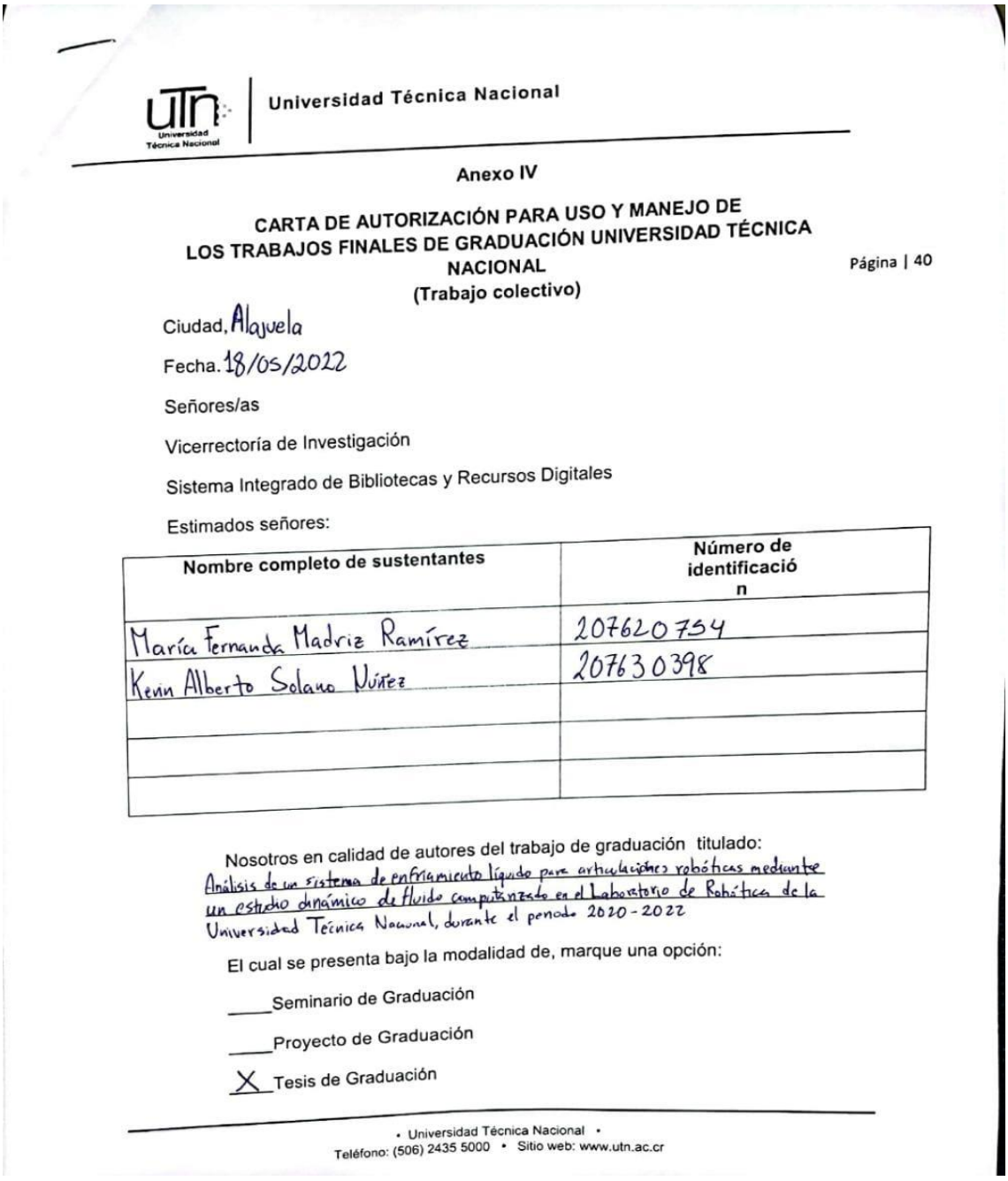
_____

María Fernanda Madriz Ramírez
Cédula 2 0762 0754

_____

Kevin Alberto Solano Núñez
Cédula 2 0763 0398

Anexo 7. Carta de Autorización para Uso y Manejo de los Trabajos Finales de Graduación.



Universidad Técnica Nacional

Anexo IV

CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA USO Y MANEJO DE LOS TRABAJOS FINALES DE GRADUACIÓN UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL

(Trabajo colectivo)

Ciudad, Alajuela

Fecha. 18/05/2022

Señores/as

Vicerrectoría de Investigación

Sistema Integrado de Bibliotecas y Recursos Digitales

Estimados señores:

Nombre completo de sustentantes	Número de identificación
María Fernanda Madriz Ramírez	207620754
Kevin Alberto Solano Núñez	207630398

Nosotros en calidad de autores del trabajo de graduación titulado:

Análisis de un sistema de enfriamiento líquido para articulaciones robóticas mediante un estudio dinámico de fluido computarizado en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional, durante el periodo 2020-2022

El cual se presenta bajo la modalidad de, marque una opción:

____Seminario de Graduación

____Proyecto de Graduación

__X__Tesis de Graduación

UTN Universidad Técnica Nacional | **Universidad Técnica Nacional**

Presentado en la fecha Día/Mes/Año 13/05/2022 autorizamos a la Universidad Técnica Nacional, Sede Central, para que nuestro trabajo pueda ser manejado de la siguiente manera:

Autorizamos **Ver CAPÍTULO V, DISPOSICIONES, FINALES. Artículo 43. RTFG.**	
Marque con una X o un ✓	
Conservación de ejemplares para préstamo y consulta física en biblioteca	X
Inclusión en el catálogo digital del SIBIREDI (Cita catalográfica)	X
Comunicación y divulgación a través del Repositorio Institucional	X
Divulgación del resumen en el Repositorio UTN con una cantidad de 200 a 500 palabras.	X
Consulta electrónica con texto protegido	X
Descarga electrónica del documento en texto completo protegido	X
Inclusión en bases de datos y sitios web que se encuentren en convenio con la Universidad Técnica Nacional contando con las mismas condiciones y limitaciones aquí establecidas.	X

Por otra parte, declaramos que el trabajo que aquí presentamos es de plena autoría, es un esfuerzo realizado de forma conjunta, académica e intelectual con plenos elementos de originalidad y creatividad. Garantizamos que no contiene citas, ni transcripciones de forma indebida que puedan devenir en plagio, pues se ha utilizado la normativa vigente de la American Psychological Asociation (APA). Las citas y transcripciones utilizadas se realizan en el marco de respeto a las obras de terceros. La responsabilidad directa en el diseño y presentación son de competencia exclusiva, por tanto, eximo de toda responsabilidad a la Universidad Técnica Nacional.

Conscientes de que las autorizaciones no reprimen nuestros derechos patrimoniales como autores del trabajo. Confiamos en que la Universidad Técnica Nacional respete y haga respetar nuestros derechos de propiedad intelectual.

Nombre del estudiante	**Cédula**	**Firma**

Por otra parte declaramos que el trabajo que aquí presentamos es de plena autoría, es un esfuerzo realizado de forma conjunta, académica e intelectual con plenos elementos de originalidad y creatividad. Garantizamos que no contiene citas, ni transcripciones de forma indebida que puedan devenir en plagio, pues se ha utilizado la normativa vigente de la American Psychological Asociation (APA). Las citas y transcripciones utilizadas se realizan en el marco de respeto a las obras de terceros. La responsabilidad directa en el diseño y presentación son de competencia exclusiva, por tanto, eximo de toda responsabilidad a la Universidad Técnica Nacional.

Conscientes de que las autorizaciones no reprimen nuestros derechos patrimoniales como autores del trabajo. Confiamos en que la Universidad Técnica Nacional respete y haga respetar nuestros derechos de propiedad intelectual.

Nombre del estudiante	Cédula	Firma
María Fernanda Madriz Ramírez	2-0762-0754	María Madriz
Kevin Alberto Solano Núñez	2-0763-0398	

Día: 18/05/2022

(Reformado mediante Acuerdo 9-3-2021, tomado por el Consejo Universitario en la Sesión Ordinaria No. 3-2021, celebrada el jueves 11 de febrero de 2021, a las nueve horas, según el Artículo 12. Publicado en el diario oficial La Gaceta No. 39 del 25 de febrero del 2021, sección de Reglamentos).

Universidad Técnica Nacional

María Fernanda Madriz Ramírez	2-0762-0754	María Madriz
Kevin Alberto Solano Núñez	2-0763-0398	Kevin M

Día: 18/05/2022

Autorizamos	SI	No
Conservación de ejemplares para préstamo y consulta física en biblioteca	X	
Inclusión en el catálogo digital del SIBIREDI (Cita catalográfica)	X	
Comunicación y divulgación a través del Repositorio Institucional	X	
Resumen (Describe en forma breve el contenido del documento)	X	
Consulta electrónica con texto protegido	X	
Descarga electrónica del documento en texto completo protegido	X	
Inclusión en bases de datos y sitios web que se encuentren en convenio con la Universidad Técnica Nacional contando con las mismas condiciones y limitaciones aquí establecidas.	X	

Anexo 8. Acta de Aprobación Defensa de Tesis

Universidad Técnica Nacional
Sede Central
CARRERA: LICENCIATURA EN PRODUCCION INDUSTRIAL

ACTA DE APERTURA 01-2022

Acta de apertura de la sesión No. 01, del día 13 de mayo del 2022, a las 19:00 horas y 00 minutos se da sita de manera virtual por medio de Zoom este Tribunal Evaluador para recibir la sustentación del Trabajo Final de Graduación, realizado por los estudiantes: Kevin Alberto Solano Núñez con cédula 207630398 y María Fernanda Madriz Ramírez 207620754 quienes opta por el Grado Académico de Licenciatura en Ingeniería en Producción Industrial, presentando el Trabajo Final con el tema: **"Análisis de un sistema de enfriamiento líquido para articulaciones robóticas mediante un estudio dinámico de fluido computarizado en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional, durante el periodo 2020-2022"**

El Tribunal está conformado por el Ing. Mauricio Rodríguez Calvo en calidad de tutor del Trabajo Final de Graduación, el Ing. Alexis Morales Quesada en calidad de lector y el Ing. Roberto Orozco Sánchez como representante de la Dirección y Presidente de este tribunal.

El señor Presidente del Tribunal manifiesta que los miembros del mismo leyeron el documento final, y dan por aprobado el documento para que sea presentado en forma oral, en consecuencia, procede a recibir la sustentación correspondiente.

Los estudiantes tienen un tiempo de 30 minutos para desarrollar su exposición, terminada la misma, se procede a dar la palabra a los miembros de este tribunal para formular preguntas sobre diferentes aspectos del proyecto realizado y externar los comentarios pertinentes por una única vez. El orden de intervención será siguiente: primero el lector, seguido el tutor y finaliza el período de preguntas el Presidente de este Tribunal.

Concluida la sustentación, el Tribunal, solicita a los presentes retirarse de la sala para proceder a deliberación y la votación asignación de la calificación.

Se Inicia la sesión a las: 19 horas y 11 minutos.

Ing. _____
Profesor Tutor

Ing. _____
Profesor Lector

Ing. _____
Presidente del Tribunal Examinador

Central Telefónica: 2435-5000, Ext. 1039

Universidad Técnica Nacional
Sede Central
CARRERA: LICENCIATURA EN PRODUCCION INDUSTRIAL

Estudiantes Sustentantes:

Kevin Alberto Solano Núñez

María Fernanda Madriz Ramírez María Madriz

Universidad Técnica Nacional
Sede Central
CARRERA: LICENCIATURA EN PRODUCCION INDUSTRIAL

ACTA DE CIERRE 01-2022

En la ciudad de Alajuela, a los trece días de mayo de dos mil veinte y uno, al ser las 20:23, estando presente en la Sede Central de la Universidad Técnica Nacional, las siguientes personas:

Mauricio Rodríguez Calvo,	**Profesor Tutor**
Alexis Morales Quesada,	**Profesor Lector**
Roberto Orozco Sánchez,	**Presidente del Tribunal Examinador**

En su condición de miembros del Tribunal Evaluador, para valorar el proyecto de graduación y optar por el grado de **Licenciatura en Ingeniería en Producción Industrial**, de los postulantes:

Kevin Alberto Solano Núñez, cédula de identidad: 207630398
María Fernanda Madriz Ramírez, cédula de identidad: 207620754

Reunido el Tribunal Evaluador los aspirantes procedieron a presentar su tema:

"Análisis de un sistema de enfriamiento líquido para articulaciones robóticas mediante un estudio dinámico de fluido computarizado en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional, durante el período 2020-2022"

Concluida la presentación del proyecto, el Tribunal Evaluador considera que, de conformidad con la normativa en la materia, obtiene una calificación de 9,3E y cumpliendo con las exigencias requeridas para la aprobación se les es conferido el grado de

Licenciatura en Ingeniería en Producción Industrial.

Asimismo, acreedores de mención honorífica No ( ) Si (X)

Ing. _____
Profesor Tutor

Ing. _____
Profesor Lector

Ing. _____
Presidente del Tribunal Examinador

Observaciones:

UTN

Exioni Gonzalez Araya <egonzaleza@utn.ac.cr>

Aprobación acta de defensa de Tesis

1 mensaje

Alexis Morales Quesada <amoralesq@utn.ac.cr> 13 de mayo de 2022, 20:34
Para: Roberto Orozco Sánchez <rorozcoe@utn.ac.cr>
Cc: Exioni Gonzalez Araya <egonzaleza@utn.ac.cr>

Alexis Morales Quesada

Lector

Manifiesto mi aprobación con acta leída.

13 de mayo de 2022

Análisis de un sistema de enfriamiento líquido para articulaciones robóticas mediante un estudio dinámico de fluido computarizado en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Técnica Nacional, durante el periodo 2020-2022

Exioni Gonzalez Araya <egonzaleza@utn.ac.cr>

Confirmación de la defensa de tesis de Kevin y Fernanda

1 mensaje

Mauricio Rodriguez Calvo <mrodriguezc@utn.ac.cr> 13 de mayo de 2022, 20:48
Para: Roberto Orozco Sánchez <rorozcos@utn.ac.cr>, Exioni Gonzalez Araya <egonzaleza@utn.ac.cr>
Cc: Alexis Morales Quesada <amoralesq@utn.ac.cr>

Buenas noches estimado director de carrera,

Por este medio, doy mi aval y aprobación a la nota de la defensa de tesis definida el día de hoy viernes 13 de mayo a las 8:20 pm para los estudiantes Kevin Alberto Solano Núñez, cédula de identidad: 207630398 y María Fernanda Madriz Ramírez, cédula de identidad: 207620754 para optar por el grado de Licenciados en Ingeniería en Producción industrial de la sede central de la Universidad Técnica Nacional.

Mis más mejores deseos a los nuevos profesionales de esta disciplina.

Que pasen un excelente día.

--
Ing. Mauricio Rodríguez Calvo. M.Sc
Profesor Investigador, Carrera de Electrónica
Universidad Técnica Nacional

Anexo 9. Resumen

RESUMEN

El sistema de refrigeración es una de las partes más importantes de un robot, un correcto diseño le permite aumentar su capacidad, a la vez que reduce las posibilidades de un mal funcionamiento. En general, los sistemas de refrigeración para robots humanoides requieren de características especiales para no interferir en su óptimo funcionamiento; aspectos como el peso, el tamaño, los materiales y el posicionamiento de este sistema son cruciales para lograr la máxima eficiencia.

El problema actual en este diseño es que el sistema de enfriamiento necesita mantener su potencia para realizar tareas al levantar pesos pesados sin consecuencias como la reducción de la movilidad de la articulación y baja eficiencia del robot. Por lo cual, en este trabajo se estudian, analizan y descartan las opciones existentes de actuadores de motores eléctricos. Una vez que se obtuvieron las opciones viables, se procedió a realizar un diseño adecuado, mediante un estudio de dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) y se obtuvieron las medidas de extracción de calor.

Realizado el estudio, se logró determinar que este diseño es altamente eficiente al extraer calor de manera rápida, hasta 17,5 °C menos en los primeros dos minutos; además de mantener una temperatura constante que lo mantiene en equilibrio durante su funcionamiento, evitando caer en momentos críticos donde la temperatura sube a niveles que puedan afectar al robot a corto, mediano y largo plazo.

Palabras clave: robot humanoide, sistema de refrigeración, intercambiador de calor, transferencia de calor, dinámica de fluidos computacional, diseño.