



Diseño e implementación de un sistema de transferencia de calor para el reómetro de hormigones del Laboratorio de Reología que permita caracterizar otro tipo de fluidos no newtonianos a diferentes temperaturas

Espinoza Noboa, Nixon Paul

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

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

Ing. Carrión Matamoros, Luis Miguel, PhD.

Sangolquí, 10 de agosto del 2023



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Resultados de la herramienta de verificación de similitud de contenidos



tesis_Nixon_Espinoza_copleaks.pdf

Scan details

Scan time:
August 15th, 2023 at 20:46 UTC

Total Pages:
69

Total Words:
17119

Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	0.5%	87
Minor Changes	0.3%	53
Paraphrased	3.4%	589
Omitted Words	0%	0

AI Content Detection



Text coverage

- AI text
- Human text



Firmado electrónicamente por:

LUIS MIGUEL CARRION MATAMOROS

Ing. Luis Miguel Carrión Matamoros, Ph.D.

Director trabajo de titulación



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Diseño e implementación de un sistema de transferencia de calor para el reómetro de hormigones del Laboratorio de Reología que permita caracterizar otro tipo de fluidos no newtonianos a diferentes temperaturas”** fue realizado por el señor **Espinoza Noboa Nixon Paul**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 10 de agosto de 2023



Firmado electrónicamente por:

LUIS MIGUEL CARRION MATAMOROS

Ing. Luis Miguel Carrión Matamoros, Ph.D.

C.C.: 1103574677



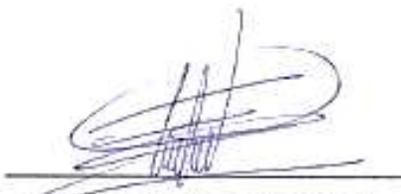
Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Espinoza Noboa Nixon Paul**, con cédula de ciudadanía n° **100400331-3**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"Diseño e implementación de un sistema de transferencia de calor para el reómetro de hormigones del Laboratorio de Reología que permita caracterizar otro tipo de fluidos no newtonianos a diferentes temperaturas"** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 10 de agosto de 2023



Espinoza Noboa Nixon Paul

C.C.: 100400331-3



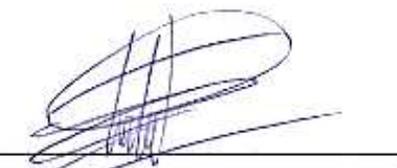
Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Autorización de Publicación

Yo Espinoza Noboa Nixon Paul, con cédula de ciudadanía n° 100400331-3, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “**Diseño e implementación de un sistema de transferencia de calor para el reómetro de hormigones del Laboratorio de Reología que permita caracterizar otro tipo de fluidos no newtonianos a diferentes temperaturas**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 10 de agosto de 2023



Espinoza Noboa Nixon Paul

C.C.: 100400331-3

Dedicatoria

Dedico mi trabajo de fin de carrera a mis padres por el sustento, sacrificio y paciencia que me brindaron para lograr ser un profesional y una persona con valores.

A mis hermanos y abuelos, por el incansable apoyo emocional que me sirvió para seguir adelante hasta alcanzar el objetivo.

A Carolina Miño, que fue parte fundamental durante el proceso de mi formación como profesional por su constante motivación, apoyo y acompañamiento.

Agradecimiento

Muchas gracias a mis familiares más cercanos que de algunas maneras me ayudaron durante el proceso para lograr el objetivo de obtener mi título de grado.

A mis padres por haberme criado y forjado con disciplina y valores para alcanzar mis metas y nunca darme por vencido.

A Carolina Miño por siempre estar presente en los momentos más difíciles y brindarme su apoyo tanto emocional como material incondicionalmente.

Contenido

Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Resumen	20
Abstract	21
Capítulo 1: Introducción.....	22
Descripción del proyecto.....	22
Justificación e importancia	22
Área de influencia	23
Situación inicial del prototipo de reómetro.....	23
Objetivos.....	25
Objetivo general	25
Objetivos específicos.....	25
Alcance del proyecto.....	26
Capítulo 2: Marco teórico.....	27
Reología	27
Viscosidad	27
Tipos de viscosidad	28
Viscosidad dinámica	28
Viscosidad aparente	28
Viscosidad cinemática	28
Factores que influyen en la viscosidad.....	29
Relación de la viscosidad con la velocidad de deformación.....	29

Relación de la viscosidad con la temperatura.....	29
Clasificación reológica de los fluidos.....	30
Fluido newtoniano.....	30
Fluido no newtoniano.....	31
Tipos de fluidos no newtonianos.....	31
Independientes del tiempo.....	32
Reofluidizante.....	32
Reoespesante.....	33
Dependientes del tiempo.....	33
Tixotrópico.....	34
Anti-tixotrópico.....	34
Visco plástico.....	35
Viscoelástico.....	35
Modelos reológicos.....	35
Modelo plástico de Bingham.....	36
Modelo de Ostwald – de Waele.....	36
Modelo de Herschel Bulkley.....	37
Reometría.....	38
Reómetro.....	38
Tipos de reómetros de corte.....	39
Reómetro de pipa o capilar.....	39

	10
Reómetro de cono y placa.....	40
Reómetro rotacional de paletas	40
Reómetro absoluto Discovery HR2 TA.....	43
Transferencia de calor	44
Tipos de transferencia de calor	45
Conducción	45
Convección	47
Radiación	48
Calor específico	49
Resistencia térmica.....	50
Equilibrio térmico	52
Entalpía	52
Refrigeración	52
Modos de operación de los sistemas de refrigeración.....	53
Sistema de refrigeración directa	53
Sistema de refrigeración indirecta	53
Métodos de refrigeración	53
Refrigeración por absorción.....	53
Sistema de compresión de vapor	54
Funcionamiento del sistema de refrigeración por compresión de vapor	54
Compresor	54

	11
Condensador.....	55
Dispositivo de expansión.....	55
Evaporador.....	55
Clasificación de los refrigerantes	56
Clasificación según su composición química	56
Clasificación por su inflamabilidad y su toxicidad	57
Diagrama de Mollier.....	58
Método de calentamiento por baño maría	60
Modelos matemáticos de ajuste.....	61
Ajuste de curvas	61
Análisis de regresión.....	62
Regresión polinomial	62
Método de mínimos cuadrados	62
Capítulo 3: Diseño y selección de componentes mecánicos y electrónicos.....	64
Información.....	65
Investigación.....	65
Requerimientos del sistema de transferencia de calor.....	65
Especificaciones	66
Diseño	66
Diseño mecánico.....	67
Diseño eléctrico electrónico.....	68
Decisión.....	71

Cálculo.....	71
Diseño sistema baño maría	72
Selección de material del recipiente almacenador.....	73
Balance energético.....	75
Diseño sistema de refrigeración por compresión de vapor.....	78
Determinación de la carga calórica.....	79
Selección del refrigerante.....	79
Selección del sistema de refrigeración	81
Cálculo del ciclo de refrigeración	81
Determinación temperatura de condensación.....	81
Determinación temperatura de evaporación	82
Trazado del ciclo de refrigeración.....	83
Cálculo de parámetros del ciclo de refrigeración	85
Selección de componentes	88
Selección del compresor	88
Selección del evaporador	89
Selección del condensador.....	90
Selección del regulador de presión.....	91
Selección de la niquelina.....	92
Selección del controlador	93
Selección de los sensores.....	95

Selección de los pre actuadores.....	96
Capítulo 4: Construcción del sistema de transferencia de calor.....	98
Modificación de la estructura de soporte.....	98
Montaje de la resistencia eléctrica.....	98
Montaje del evaporador.....	99
Montaje del condensador.....	99
Montaje del compresor.....	100
Montajes dispositivos electrónicos.....	101
Construcción del recipiente almacenador del fluido de estudio.....	101
Construcción soporte para sensores de temperatura.....	102
Recubrimiento del tanque contenedor de agua.....	102
Programación y comunicación.....	103
Modificación interfaz HMI.....	104
Capítulo 5: Pruebas y Resultados.....	106
Condiciones del ensayo teórico.....	106
Pruebas con jabón líquido.....	107
Condiciones del ensayo experimental.....	107
Caracterización reológica jabón líquido.....	107
Salsa de tomate.....	113
Condiciones ensayo experimental salsa de tomate.....	113
Caracterización reológica salsa de tomate.....	114
Melaza de Caña.....	121

Condiciones del ensayo experimental melaza de caña	121
Caracterización reológica de la melaza	121
Capítulo 6: Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros	126
Conclusiones	126
Recomendaciones	128
Trabajos futuros	128
Referencias	129
Apéndices	133

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Especificaciones técnicas del reómetro de hormigones del Laboratorio de Reología.</i>	24
Tabla 2. <i>Características del recipiente contenedor del reómetro de hormigones del Laboratorio de Reología.</i>	24
Tabla 3. <i>Valores del índice de comportamiento de flujo</i>	37
Tabla 4. <i>Calor específico de algunos materiales</i>	50
Tabla 5. <i>Expresiones matemáticas para calcular la resistencia térmica</i>	51
Tabla 6. <i>Clasificación de los refrigerantes por su seguridad</i>	58
Tabla 7. <i>Matriz de comparación y selección mecanismos de calentamiento</i>	67
Tabla 8. <i>Matriz de comparación y selección mecanismos de enfriamiento</i>	68
Tabla 9. <i>Matriz de comparación y selección sensores de temperatura</i>	69
Tabla 10. <i>Matriz de comparación y selección controladores</i>	70
Tabla 11. <i>Matriz de selección de material del recipiente almacenador del fluido de estudio</i>	74
Tabla 12. <i>Propiedades térmicas y generales del aluminio</i>	74
Tabla 13. <i>Matriz de comparación y selección del refrigerante</i>	80
Tabla 14. <i>Humedad relativa para determinar la temperatura de evaporación</i>	82
Tabla 15. <i>Condiciones de trabajo en evaporación y condensación</i>	83
Tabla 16. <i>Valores de temperatura, presión y entalpía de cada punto del ciclo de refrigeración</i>	84
Tabla 17. <i>Matriz de comparación y selección del compresor</i>	88
Tabla 18. <i>Especificaciones técnicas del compresor</i>	89
Tabla 19. <i>Especificaciones técnicas del condensador</i>	91
Tabla 20. <i>Especificaciones técnicas del filtro secador</i>	92
Tabla 21. <i>Especificaciones técnicas de la niquelina</i>	93
Tabla 22. <i>Selección del controlador</i>	94
Tabla 23. <i>Especificaciones técnicas del controlador</i>	94
Tabla 24. <i>Especificaciones técnicas del sensor de temperatura</i>	95

Tabla 25. <i>Especificaciones del preactuador</i>	97
Tabla 26 <i>Temperaturas registradas del jabón líquido</i>	107
Tabla 27 <i>Datos medidos del jabón líquido</i>	108
Tabla 28 <i>Datos experimentales velocidad de corte y esfuerzo de cizalla jabón líquido</i>	108
Tabla 29 <i>Datos teóricos velocidad de corte y esfuerzo de cizalla jabón líquido</i>	108
Tabla 30 <i>Datos teóricos y experimentales jabón líquido a 20°C</i>	109
Tabla 31 <i>Datos teóricos y experimentales jabón líquido a 40°C</i>	111
Tabla 32 <i>Reducción del error de medición</i>	112
Tabla 33 <i>Parámetros reológicos jabón líquido</i>	113
Tabla 34 <i>Temperaturas registradas de la salsa de tomate</i>	113
Tabla 35 <i>Datos medidos de la salsa de tomate</i>	114
Tabla 36 <i>Datos experimentales velocidad de corte y esfuerzo de cizalla salsa de tomate</i>	114
Tabla 37 <i>Datos teóricos velocidad de corte y esfuerzo de cizalla salsa de tomate</i>	115
Tabla 38 <i>Datos teóricos y experimentales salsa de tomate a 20°C</i>	115
Tabla 39 <i>Reducción del error de medición salsa de tomate a 20°C</i>	116
Tabla 40 <i>Datos teóricos y experimentales salsa de tomate a 40°C</i>	118
Tabla 41 <i>Reducción del error de medición salsa de tomate a 40°C</i>	119
Tabla 42 <i>Parámetros reológicos salsa de tomate</i>	120
Tabla 43 <i>Temperaturas registradas de la melaza de caña</i>	121
Tabla 44 <i>Datos medidos de la melaza a 20°C</i>	121
Tabla 45. <i>Datos experimentales de velocidad de corte y esfuerzo para la melaza a 20°C</i>	122
Tabla 46. <i>Datos teóricos de velocidad de corte y esfuerzo para la melaza a 20°C</i>	122
Tabla 47. <i>Datos teóricos y experimentales de la melaza a 20°C</i>	123
Tabla 48. <i>Datos teóricos y experimentales de la melaza a 40°C</i>	124
Tabla 49 <i>Parámetros reológicos melaza de caña</i>	125

Lista de figuras

Figura 1. <i>Esquema inicial del reómetro de hormigones</i>	25
Figura 2. <i>Curva de flujo en representación de la viscosidad dinámica y aparente</i>	29
Figura 3. <i>Variación de la viscosidad dinámica ante la aplicación de temperatura</i>	30
Figura 4. <i>Curva de fluidez y viscosidad para fluidos newtonianos</i>	31
Figura 5. <i>Clasificación de los comportamientos de fluidos no newtonianos</i>	32
Figura 6. <i>Comportamiento refluidizante. a) Curva de fluidez, b) Curva de viscosidad</i>	33
Figura 7. <i>Comportamiento reoespesante. a) Curva de fluidez, b) Curva de viscosidad</i>	33
Figura 8. <i>Comportamiento tixotrópico. a) Curva de fluidez, b) Curva de viscosidad</i>	34
Figura 9. <i>Comportamiento anti-tixotrópico. a) Curva de fluidez, b) Curva de viscosidad</i>	35
Figura 10. <i>Modelos reológicos para fluidos independientes del tiempo</i>	38
Figura 11. <i>Reómetro capilar industrial</i>	39
Figura 12. <i>Reómetro de cono y placa</i>	40
Figura 13. <i>Esquema del mecanismo del prototipo de reómetro de hormigones</i>	41
Figura 14. <i>Geometría de flujo de Couette</i>	42
Figura 15. <i>Reómetro híbrido Discovery DHR2 TA</i>	43
Figura 16. <i>Copa ranurada y vano rotativo para geometría de cilindros concéntricos</i>	44
Figura 17. <i>Flujo de calor por conducción en paredes planas</i>	45
Figura 18. <i>Conducción de calor en un cilindro</i>	46
Figura 19. <i>Conductividad térmica de algunos materiales</i>	47
Figura 20. <i>Transferencia de calor por convección</i>	48
Figura 21. <i>Transferencia de calor por radiación</i>	49
Figura 22. <i>Equivalencia conceptual de resistencia térmica y eléctrica</i>	50
Figura 23. <i>Red de resistencias térmicas en paredes cilíndricas</i>	51
Figura 24. <i>Representación gráfica del proceso de equilibrio térmico</i>	52
Figura 25. <i>Ciclo de refrigeración del sistema de compresión de vapor</i>	55

Figura 26. Clasificación de los refrigerantes según su composición química	57
Figura 27. Zonas y delimitaciones características del diagrama de Mollier	59
Figura 28. Parámetros del diagrama p-h de un refrigerante	60
Figura 29. Esquema del calentamiento por baño maría	61
Figura 30. Ejemplo de ajuste lineal (línea verde) y ajuste cuadrático polinomial (línea roja) por el método de mínimos cuadrados	63
Figura 31. Esquema del baño maría y dimensiones de los recipientes cilíndricos.....	72
Figura 32. Gráfica de conductividad térmica y resistencia al agua de materiales metálicos	73
Figura 33. Esquema de resistencias térmicas para el tanque contenedor de agua	76
Figura 34. Esquema de resistencias térmicas para el recipiente almacenador.....	77
Figura 35. Propiedades físicas del refrigerante R134A	81
Figura 37. Diagrama de Mollier para el ciclo de compresión de vapor	84
Figura 38. Compresor hermético Sikelan QD30H11	89
Figura 39. Tubería flexible de cobre tipo ACR.....	90
Figura 40. Condensador de tubo de alambre para refrigerador doméstico	91
Figura 41. Filtro secador de cobre.....	92
Figura 42. Termo resistencia eléctrica de 1.2 kW.....	93
Figura 43. Controlador Arduino UNO R3 ATmega328P	94
Figura 44. Termocupla tipo K y su módulo transmisor MAX6675	95
Figura 45. Sensor de temperatura sumergible DS18B20	96
Figura 46. Módulo relé con optoacoplador	97
Figura 47. Esquema de la modificación de la estructura de soporte.....	98
Figura 48. Niquelina fijada dentro del tanque contenedor de agua.....	98
Figura 49. Montaje de las tuberías del evaporador	99
Figura 50. Esquema estructura de apoyo del condensador	100
Figura 51. Condensador montado en la estructura	100

Figura 52. <i>Compresor instalado con sus conexiones y cargado de refrigerante</i>	101
Figura 53. <i>Montaje de dispositivos electrónicos</i>	101
Figura 54. <i>Construcción recipiente almacenador del fluido de estudio</i>	102
Figura 55. <i>Soporte para sensores de temperatura</i>	102
Figura 56. <i>Recubrimiento del tanque contenedor</i>	103
Figura 57. <i>Esquema de sistema de control</i>	104
Figura 58. <i>Interfaz HMI incorporada al prototipo</i>	104
Figura 59. <i>Almacenamiento de información</i>	105
Figura 60. <i>Ensayo de tipo estado estacionario</i>	106
Figura 61. <i>Curvas de flujo del jabón líquido a 20°C</i>	109
Figura 62. <i>Ajuste Ley de Potencias jabón líquido</i>	110
Figura 63. <i>Curvas de flujo jabón líquido a 40°C</i>	111
Figura 64. <i>Curva de flujo ajustada salsa de tomate a 20°C</i>	112
Figura 65. <i>Curvas de flujo salsa de tomate a 20°C</i>	116
Figura 66. <i>Ajuste por Ley de Potencias salsa de tomate a 20°C</i>	117
Figura 67. <i>Curvas de flujo salsa de tomate a 40°C</i>	118
Figura 68. <i>Curvas de flujo de la salsa de tomate a 40°C con la corrección</i>	119
Figura 69. <i>Ajuste por Ley de Potencias salsa de tomate a 40°C</i>	120
Figura 70. <i>Curvas de flujo melaza a 40°C</i>	123
Figura 71. <i>Curvas de flujo melaza de caña a 40°C</i>	124

Resumen

El presente proyecto de grado muestra el diseño e implementación de un sistema de transferencia de calor para el prototipo de reómetro de hormigones del Laboratorio de Reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE con el fin de mejorar la capacidad de medición del prototipo, permitiendo adquirir información reológica de fluidos no newtonianos a temperaturas diferentes de la temperatura ambiente. El sistema de transferencia de calor incorpora materiales y componentes para mantener el fluido de estudio dentro de un rango de temperatura constante durante el ensayo. El principio funcional del proyecto se desarrolló en base al método de calentamiento por baño maría y la estructura del sistema de transferencia de calor esta principalmente compuesto por dos módulos, uno de enfriamiento y otro de calentador, gestionados por un procedimiento de adquisición y manejo de datos que juntamente con la información que se obtiene de los ensayos reológicos se determina la variabilidad de la viscosidad con la temperatura.

Para mantener el fluido de estudio a una temperatura constante, entran en acción el módulo de enfriamiento que consiste en un ciclo de refrigeración por compresión de vapor y una termo resistencia eléctrica como parte del módulo de calentamiento que, respectivamente, restan y aportan calor al agua que se utiliza como fluido de transmisión de calor para el método de baño maría. Cada componente se pone en funcionamiento dependiendo de la temperatura actual del fluido de estudio y la temperatura de trabajo que se requiere alcanzar. La adquisición de información de los sensores y comunicación de datos se ejecuta a través de un microcontrolador que mediante comunicación serial con el ordenador transfiere la información donde se ejecutan acciones de control que administran el funcionamiento del sistema de transferencia de calor desde el interfaz humano máquina compartida con el ya existente, del sistema de potencia del prototipo de reómetro.

Palabras clave: viscosidad, transferencia de calor, curva de flujo

Abstract

This degree project shows the design and implementation of a heat transfer system for the concrete rheometer prototype of the Rheology Laboratory of the University of the Armed Forces - ESPE in order to improve the measurement capacity of the prototype, allowing to acquire rheological information of non-Newtonian fluids at temperatures different from room temperature. The heat transfer system incorporates materials and components to maintain the study fluid within a constant temperature range during the test. The functional principle of the project was developed based on the water bath heating method and the structure of the heat transfer system is mainly composed of two modules, one for cooling and the other for heating, managed by a data acquisition and management procedure that, together with the information obtained from rheological tests, determines the variability of viscosity with temperature.

To keep the study fluid at a constant temperature, the cooling module that consists of a refrigeration cycle by vapor compression and an electric resistance heater come into action as part of the heating module that, respectively, subtract and add heat to the water that is used as heat transfer fluid for the bain-marie method. Each component is put into operation depending on the current temperature of the study fluid and the working temperature that is required to be reached. The acquisition of information from the sensors and data communication is executed through a microcontroller that through serial communication with the computer transfers the information where control actions are executed that manage the operation of the heat transfer system from the human machine interface shared with the already existing power system of the rheometer prototype.

Keywords: viscosity, heat transfer, flow curve

Capítulo 1: Introducción

Descripción del proyecto

El presente proyecto de grado consiste en mejorar la capacidad de medición del prototipo de reómetro de hormigones del Laboratorio de Reología de la ESPE incorporando materiales y componentes que conformen un sistema de transferencia de calor que mediante un control de temperatura del equipo sea posible realizar estudios reológicos a determinada temperatura, así como también una actualización de la interfaz HMI donde se controla y monitorea los ensayos reológicos a realizar y el estado de temperatura de la muestra. Además, validar la curva de flujo estacionaria con otros fluidos no newtonianos.

Justificación e importancia

El propósito del trabajo de investigación es diseñar e implementar un sistema de transferencia de calor para el prototipo de reómetro de hormigones del laboratorio de reología, con dicha modificación el equipo permitirá realizar estudios reológicos a distintos rangos de temperatura. Mediante el sistema de transferencia de calor es posible ejecutar estudios reológicos manteniendo el fluido a analizar a una temperatura constante, ya que la viscosidad tiene una gran dependencia con la temperatura y es importante conocer como esta incide en ciertos fluidos. Nuestro país Ecuador, tiene gran variedad de zonas climáticas muy marcadas para lo cual es indispensable contar con un reómetro que pueda ser utilizado en cualquier parte, especialmente en campo, y poder realizar estudios reológicos de distintos fluidos no newtonianos manteniéndolos a determinada temperatura.

La ejecución de este proyecto es importante ya que la mayoría de los fluidos de uso práctico son de tipo no newtoniano y en cualquier proceso como procesamiento de minerales, procesamiento de alimentos, procesos farmacéuticos, entre otros, infaliblemente se requerirá del conocimiento de sus propiedades reológicas para evaluar el rendimiento del producto, razón por la cual es necesario caracterizar la curva de flujo estacionario del reómetro para realizar análisis

de diferentes fluidos no newtonianos permitiendo conocer su comportamiento y dar versatilidad al prototipo. Además, la temperatura afecta en la capacidad de flujo de ciertas sustancias, haciendo necesario implementar un sistema de transferencia de calor que permita ejecutar estudios reológicos a diferentes temperaturas. Si bien existen en el mercado instrumentos que permiten caracterizar de manera reológica distintos fluidos variando su temperatura, sus costos de capital y de mantención, la calibración y la adecuación de un espacio los hacen poco idóneos para su uso dentro y fuera del laboratorio e incluso poco de ellos se pueden considerar portátiles.

Área de influencia

El área de influencia directa del proyecto es el Laboratorio de Reología y Fluidos Complejos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE sede Sangolquí.

Situación inicial del prototipo de reómetro

El prototipo de reómetro diseñado específicamente para realizar ensayos reológicos de hormigones autocompactantes consta de dos sistemas principales. Un sistema con elementos de potencia conformado por un motor eléctrico trifásico, accionado por un variador de frecuencia y adaptado con una caja reductora, que tiene adecuado un cabezal impulsor en donde se inserta la geometría de paleta que gira dentro del fluido de estudio. El otro sistema es de control y adquisición de datos compuesto por dos microcontroladores que intercambian información con el computador para ser presentada en un interfaz humano máquina. A continuación, se enlistan las características del reómetro.

Tabla 1.

Especificaciones técnicas del reómetro de hormigones del Laboratorio de Reología.

DISPOSITIVO	DESCRIPCIÓN
Actuador	Motor AC WEG W22 de 0,5 HP
Caja reductora	Reductor BW50Q sinfín - corona
Relación caja reductora	40:1
Variador de frecuencia	Powtran PI130
Controladores	Arduino UNO
Transductor	Encoder infrarrojo FC-03

Tabla 2.

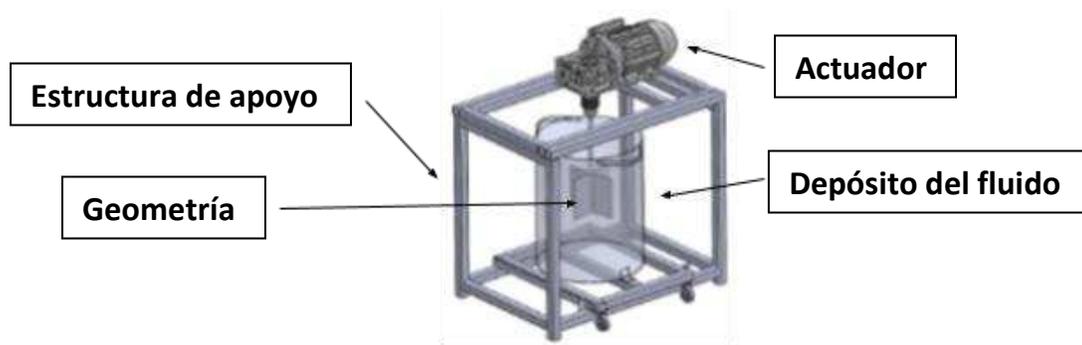
Características del recipiente contenedor del reómetro de hormigones del Laboratorio de Reología.

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN
Tamaño del recipiente cilíndrico	Diámetro: 30 cm Altura: 40 cm
Volumen de la mezcla	24,74 litros
Capacidad del recipiente	57,4 kg
Material del recipiente	Acero galvanizado
Material del vano	Acero ASTM A36
Radio del vano	7,25 cm
Distancia vano - fondo	15 cm

En la Figura 1, se muestra un esquema del estado inicial del reómetro de hormigones con sus partes constitutivas.

Figura 1.

Esquema inicial del reómetro de hormigones



Nota. Tomado de (Gómez & Paredes, 2020)

Las modificaciones efectuadas al prototipo de reómetro de hormigones se realizaron respetando las consideraciones de diseño inicial, así como las relaciones geométricas del depósito y geometría de vano, sin alterar su funcionalidad.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de transferencia de calor para el prototipo de reómetro de hormigones existente en el laboratorio de reología que permita caracterizar además de hormigones autocompactantes, otros fluidos no newtonianos a diferentes temperaturas.

Objetivos específicos

- Conceptualizar y diseñar un sistema de transferencia de calor para el prototipo de reómetro de hormigones del Laboratorio de Reología de la ESPE que admita realizar estudios reológicos dentro de un rango de temperaturas.

- Diseñar un sistema de control de temperatura para monitorizar y analizar el comportamiento reológico de fluidos no newtonianos a distintas temperaturas.
- Construir un sistema de transferencia de calor para el prototipo de reómetro de hormigones del Laboratorio de Reología de la ESPE que posibilite ejecutar los estudios reológicos a determinadas temperaturas.
- Realizar pruebas de operación del prototipo de reómetro de hormigones del Laboratorio de Reología de la ESPE efectuando estudios de las propiedades reológicas de fluidos no newtonianos.
- Validación de la curva de flujo estacionario del prototipo de reómetro de hormigones del Laboratorio de Reología de la ESPE para obtener información del comportamiento reológico de algunos fluidos no newtonianos.

Alcance del proyecto

Diseñar e implementar un sistema de transferencia de calor que permita mantener las muestras de estudio a un rango de temperatura constante superior a los 20°C, permitiendo realizar mediciones reológicas de otros fluidos no newtonianos, además de hormigones autocompactantes.

Las mediciones se tomarán en tiempo real, almacenarán y exportarán a un software externo a través de un sistema de adquisición de datos el cual contará con todas las medidas necesarias para asegurar la veracidad de los resultados. El software permitirá visualizar la variación de la temperatura en el tiempo y almacenar el histórico de las variables medidas para un posterior análisis.

Además, se actualizará el interfaz humano máquina para incorporar la visualización de las nuevas mediciones permitiendo usar el software en cualquier computador que admita su ejecución y pueda conectarse al equipo.

Capítulo 2: Marco teórico

Reología

La reología es una ciencia que se deriva de la física cuyo propósito es estudiar el flujo y la deformación de la materia, particularmente el comportamiento de los fluidos no newtonianos al ser sometidos a un esfuerzo de corte o una velocidad de deformación, permitiendo caracterizar y definir sus parámetros reológicos como la elasticidad y principalmente la viscosidad. (Barnes, 1989)

Viscosidad

La viscosidad se define como una propiedad que representa la resistencia interna de un fluido al movimiento o flujo, al ser sometido a tensiones cortantes. Esta propiedad tiene relación directa con la fuerza de cohesión de las moléculas de los líquidos y suele usarse como indicador de calidad en la producción de ciertos productos industriales. (Cengel, 2004)

Otra definición de viscosidad desde el punto de vista reológico se enuncia como la relación entre el esfuerzo de corte aplicado y la tasa de deformación adquirida por el fluido. Isaac Newton, planteó una ecuación denominada Ley de Newton de viscosidad de fluidos, la cual es actualmente aplicable a determinados fluidos. (Barnes, 1989)

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Donde:

μ : viscosidad [Pa.s]

τ : esfuerzo de corte [Pa]

$\frac{du}{dy}$: tasa de deformación [1/s]

Tipos de viscosidad

Viscosidad dinámica

A este tipo de viscosidad también se la llama viscosidad absoluta, ya que se refiere a la propiedad intrínseca de resistencia al flujo de los materiales como tal. La constante μ de la Ley de Newton de viscosidad hace referencia a este tipo de viscosidad. (Bourne, 2002)

Viscosidad aparente

La viscosidad aparente es específica para fluidos que no presentan un patrón de flujo lineal, y se establece como el cociente entre el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación. Para representar este tipo de viscosidad generalmente se utiliza la letra griega “ η ”. (Bourne, 2002)

Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática se obtiene relacionando la viscosidad dinámica con la densidad del fluido como expresa la siguiente ecuación. (Bourne, 2002)

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde:

v : viscosidad cinemática [m^2/s]

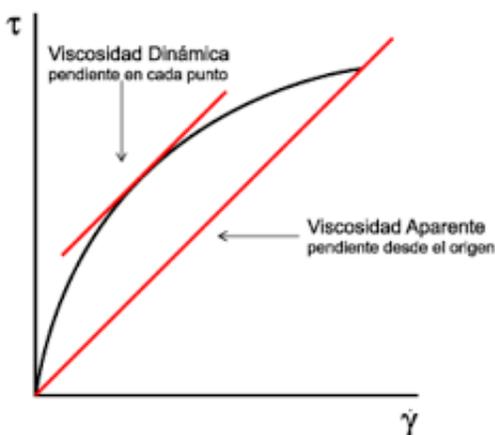
μ : viscosidad dinámica [$kg/m \cdot s$]

ρ : densidad del fluido [kg/m^3]

El comportamiento de flujo de un líquido se representa gráficamente en un diagrama cartesiano conocido como curva de flujo, donde se relaciona el esfuerzo de corte o cizalla cuyos valores se ubican en el eje de las ordenadas, con la velocidad de deformación con sus cantidades en el eje de las abscisas. También suele representarse en un diagrama llamado curva de viscosidad, con la diferencia de que en el eje de las ordenadas se ubican los valores de la viscosidad aparente. (Diaz, 2018)

Figura 2.

Curva de flujo en representación de la viscosidad dinámica y aparente



Nota. Tomado de (Chiguer, 2019)

Factores que influyen en la viscosidad

Existen variables que afectan a la viscosidad de los materiales tales como; la presión que, a diferencia de los gases, poco incide en la viscosidad de los líquidos por lo que generalmente suele omitirse excepto si se aplica una presión extremadamente alta. La concentración de sólidos solubles importante para la industria alimentaria y de manera más significativa para fluidos desde el punto de vista reológico, la velocidad de deformación y la temperatura. (Macosko, 1994)

Relación de la viscosidad con la velocidad de deformación

La incidencia de la velocidad de deformación en relación con la viscosidad radica en que permite clasificar los diferentes tipos de fluidos líquidos en rangos de magnitud de velocidad de deformación o tasa de cizalla de diversos procesos industriales y/o para el estudio de su comportamiento. (Díaz, 2018)

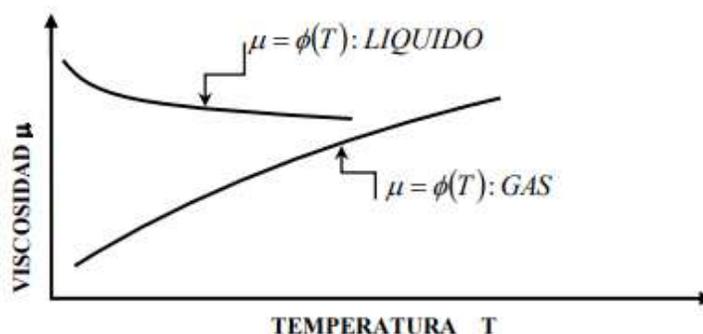
Relación de la viscosidad con la temperatura

La temperatura es un parámetro muy influyente en la viscosidad de un fluido líquido, ya que a medida que esta aumenta la viscosidad disminuye, mientras más alto sea el coeficiente de

viscosidad más alta será la afectación por la temperatura, en los gases el fenómeno ocurre de manera inversa. Cuando aumenta la temperatura de un líquido, la energía cinética de sus moléculas también aumenta dando lugar a que las fuerzas de cohesión disminuyen en magnitud, provocando una disminución de la viscosidad en la mayoría de los fluidos líquidos, existen ciertas excepciones como es el caso de los lodos de perforación. (Mott, 2006)

Figura 3.

Variación de la viscosidad dinámica ante la aplicación de temperatura



Nota. Tomado de (Pascual, 2016)

Clasificación reológica de los fluidos

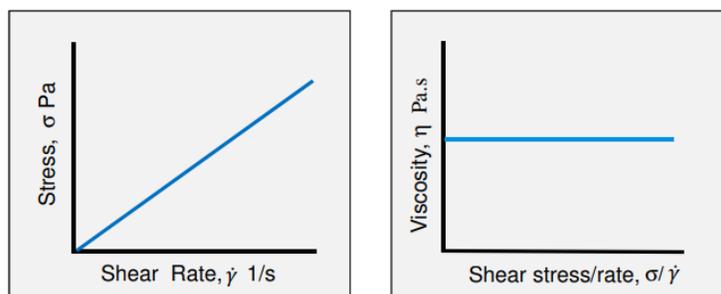
La reología precisa el estudio de las propiedades viscosas de los fluidos y los clasifica según su comportamiento. (Díaz, 2018)

Fluido newtoniano

Todo fluido que cumple la Ley de Newton de la viscosidad es considerado newtoniano, es decir, que el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación mantienen una relación lineal, por lo tanto, cuentan con viscosidad constante sin importar la magnitud de la tasa de cizalla aplicada dentro del rango de flujo laminar. (Shames, 1995)

Figura 4.

Curva de fluidez y viscosidad para fluidos newtonianos



Nota. Tomado de (TA Instruments, 2019)

Fluido no newtoniano

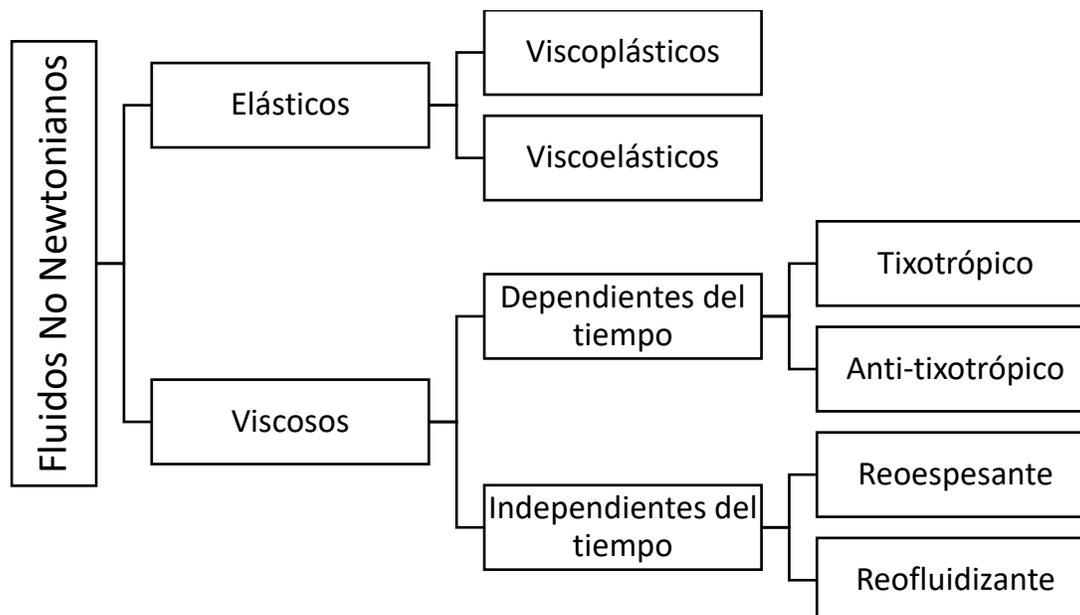
Se denominan fluidos no newtonianos a aquellos que carecen de una relación directamente proporcional entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de deformación aplicada a dicho fluido, es decir, no tiene una viscosidad constante y varía en función de la elasticidad, la temperatura o esfuerzo de corte, siendo éste último el más trascendental desde el punto de vista reológico. Para fluidos no newtonianos, la viscosidad dinámica coincide con la viscosidad aparente. (Macosko, 1994)

Tipos de fluidos no newtonianos

A los fluidos no newtonianos se los clasifica según el comportamiento que presentan al modificar variables como el esfuerzo de corte y su tiempo de aplicación, como se indica en la siguiente figura. Dado que el proyecto de investigación se centra en métodos experimentales de cizalla continua, se describen los fluidos de carácter viscoso.

Figura 5.

Clasificación de los comportamientos de fluidos no newtonianos



Independientes del tiempo

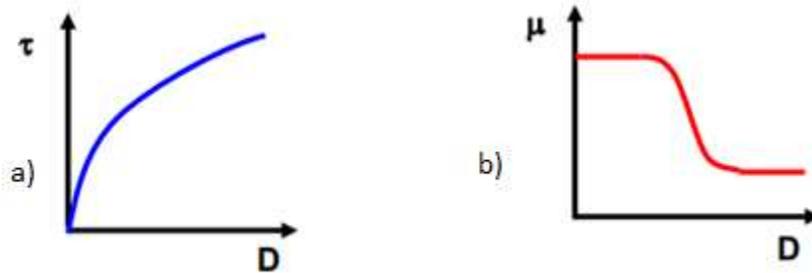
En este tipo de fluidos viscosos, el tiempo de aplicación del esfuerzo o velocidad de corte no incide en la viscosidad del fluido de estudio.

Reofluidizante

El comportamiento de un fluido no newtoniano más comúnmente exhibido es el adelgazamiento por cizalla o fluidificación por cizalla, en el cual la viscosidad del fluido disminuye a medida que se aumenta la magnitud del esfuerzo cortante independientemente del tiempo de aplicación. Aquellos fluidos que se apegan a dicho comportamiento también son conocidos como shear thinning (en inglés), como ejemplo se tiene a la sangre, melaza, jabón líquido, emulsiones, suspensiones o dispersiones. (Rubio, 2022)

Figura 6.

Comportamiento reofluidizante. a) Curva de fluidez, b) Curva de viscosidad

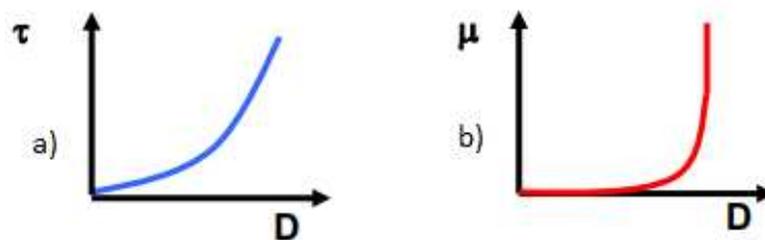


Reoespesante

También conocidos como fluidos shear thickening (en inglés), son aquellos que indican un comportamiento de espesamiento por cizalla, donde la viscosidad aumenta mientras el esfuerzo cortante crece sin considerar el tiempo de aplicación. Este comportamiento es poco común siendo visible en sustancias no puras como suspensiones de almidón en agua o de PVC. (Bourne, 2002)

Figura 7.

Comportamiento reoespesante. a) Curva de fluidez, b) Curva de viscosidad



Dependientes del tiempo

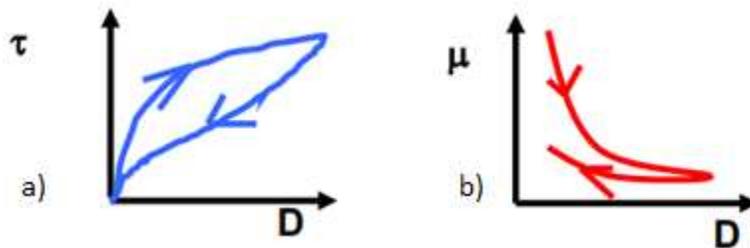
Determinados fluidos manifiestan un cambio de la viscosidad ante ciertos valores de velocidad de corte mientras aumenta el tiempo de aplicación del esfuerzo.

Tixotrópico

Dentro de los fluidos no newtonianos dependientes del tiempo, el efecto de tixotropía está presente en varios fluidos de uso común como pastas de almidón, pinturas, yogurt, determinados geles y coloides, entre otros. Este tipo de fluidos al estar sometidos a determinada velocidad de deformación constante presentan una disminución de su viscosidad aparente a medida que transcurre el tiempo de ensayo. Recuperan su estado de viscosidad inicial después de un periodo de reposo con presencia de histéresis. (Groves & Ahmad, 1976)

Figura 8.

Comportamiento tixotrópico. a) Curva de fluidez, b) Curva de viscosidad



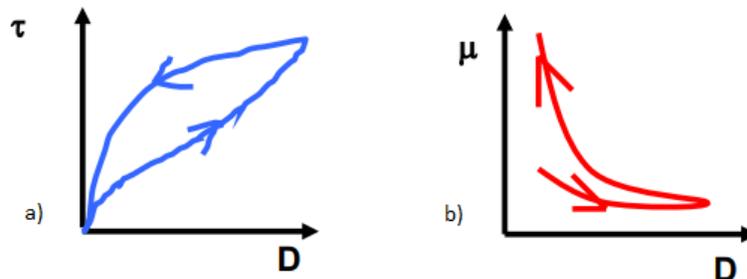
Anti-tixotrópico

A este tipo de fluidos también se los conoce como reopécticos, los cuales se comportan de manera inversa a un fluido tixotrópico, donde la viscosidad aparente muestra un crecimiento con respecto al tiempo mientras se aplica ciertos valores de velocidad de deformación constante.

Pocos son los fluidos que presentan este comportamiento como son algunos lubricantes, suspensiones de yeso o tintas de impresión. (Groves & Ahmad, 1976)

Figura 9.

Comportamiento anti-tixotrópico. a) Curva de fluidez, b) Curva de viscosidad



Visco plástico

Son sustancias que presentan un comportamiento similar a un fluido newtoniano con la diferencia que deben superar el límite elástico para que fluya, una vez alcanzado el umbral inicial el esfuerzo cortante y la velocidad de corte aumentan proporcionalmente, sin importar el tiempo de aplicación. (Rubio, 2022)

Viscoelástico

Se conoce como viscoelásticos a aquellos fluidos caracterizados por presentar comportamientos de sólidos elásticos y líquidos viscosos según las condiciones a las cuales estén sometidos. En este tipo de fluidos la pérdida de energía es casi nula, ya que la energía mecánica que se emplea se recupera de igual forma al retirar el esfuerzo aplicado. (Díaz, 2018)

Modelos reológicos

Un modelo reológico es el encargado de describir la relación existente entre la velocidad de deformación y el esfuerzo de corte mediante una expresión matemática, como es el caso de la ley de viscosidad de Newton útil únicamente para describir fluidos newtonianos. Dado que la reología se enfoca en fluidos no newtonianos, se han planteado varios modelos para representar su comportamiento de flujo. (Malkin, 1994)

Los fluidos cuya viscosidad depende del tiempo y aquellos constituidos con propiedades elásticas, requieren expresiones matemáticas más complejas que derivan de otros métodos de experimentación. A continuación, se enuncian los modelos reológicos más comúnmente aplicados para fluidos no newtonianos independientes del tiempo. (Díaz, 2018)

Modelo plástico de Bingham

El modelo plástico de Bingham representa el comportamiento de fluidos plásticos ideales, es decir, aquellos fluidos que necesitan un valor específico de esfuerzo de corte para que exista flujo, posteriormente exhiben un comportamiento lineal de la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación. (Cárdenas, 2013)

$$\tau = \mu_0 \dot{\gamma} + \tau_0; \quad |\tau| > \tau_0$$

Donde:

τ : esfuerzo de corte

$\dot{\gamma}$: velocidad de deformación

μ_0 : viscosidad plástica

τ_0 : esfuerzo umbral de fluencia

Modelo de Ostwald – de Waele

A este modelo también se lo conoce como ley de la potencia y es usado para definir el comportamiento de fluidos reoespesantes y reofluidizantes, cuya relación velocidad de deformación y esfuerzo cortante no es lineal. Este modelo cuenta con el mínimo número de parámetros posibles (K y n) para definir un comportamiento de adelgazamiento por cizalla donde interviene la temperatura. (Bourne, 2002)

El parámetro “n” es llamado índice de comportamiento reológico o comportamiento de flujo e indica la desviación de comportamiento de flujo en comparación al fluido newtoniano, mientras más grande sea el valor de “n”, menos newtoniana es la sustancia. En la Tabla 3, se muestra el rango de valores del índice de comportamiento de flujo y el tipo de fluido que describe.

Por el contrario, el parámetro "K" es relativo con la viscosidad aparente del fluido y es llamado índice de consistencia, por lo tanto, valores altos de este parámetro significa que el fluido es bastante viscoso o espeso. (Bourne, 2002)

Tabla 3.

Valores del índice de comportamiento de flujo

Índice de comportamiento de flujo	Tipo de fluido
$n = 1$	Newtoniano
$n < 1$	Reofluidizante
$n > 1$	Reoespesante

La expresión matemática correspondiente a este modelo es:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n$$

Donde:

τ : esfuerzo de corte

$\dot{\gamma}$: velocidad de deformación

K: índice de consistencia de flujo

n: índice de comportamiento de flujo

Modelo de Herschel Bulkley

A este modelo también se lo llama ley de la potencia modificada, ya que incorpora las variables de los modelos de Ostwald – de Waele y de Bingham. Es uno de los modelos reológicos más utilizados para fluidos independientes del tiempo dentro de rangos intermedios de esfuerzo de corte y velocidad de deformación. La expresión matemática para este modelo es la siguiente. (Bourne, 2002)

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$$

Donde:

τ : esfuerzo de corte

$\dot{\gamma}$: velocidad de deformación

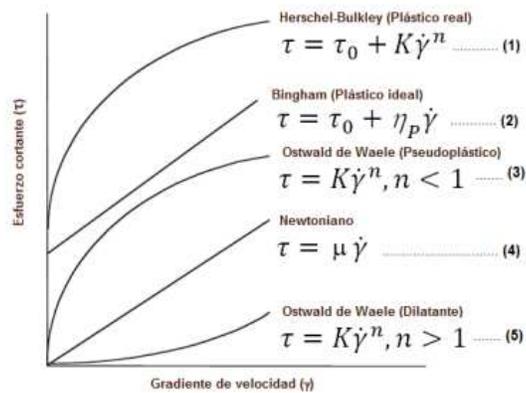
K: índice de consistencia de flujo

n: índice de comportamiento de flujo

τ_0 : esfuerzo umbral de fluencia

Figura 10.

Modelos reológicos para fluidos independientes del tiempo



Nota. Tomado de (Cárdenas, 2013)

Reometría

La reometría es una técnica que se encarga de la experimentación de la reología, describiendo métodos e instrumentos para obtener propiedades reológicas de un material. A través de un reómetro se determinan las relaciones cuantitativas entre la deformación y el esfuerzo cortante, obteniendo medidas de viscosidad y elasticidad. (Coleman, 1966)

Reómetro

Un reómetro es un instrumento de medida que proporciona características de los fluidos viscosos. Pese a ser similar a un viscosímetro, con un reómetro es posible definir un conjunto de

parámetros para describir fluidos con comportamientos más complejos con una amplia variedad de condiciones. (Barnes, 1989)

De manera general, existen dos tipos de reómetros, los reómetros extensionales que emplean esfuerzo extensionalmente y los reómetros rotativos que aplican de forma controlada un esfuerzo de cizalla, siendo estos últimos los más importantes para enunciar ya que el desarrollo del proyecto de investigación es sobre un prototipo de reómetro que cumple con dichas características.

Tipos de reómetros de corte

Reómetro de pipa o capilar

Los reómetros de este tipo son dispositivos capaces de medir la viscosidad cinemática contando el tiempo que se demora un líquido en pasar por un orificio pequeño de un tubo con dimensiones definidas y sección transversal constante, aplicando presión de forma controlada, se usan generalmente en el estudio del comportamiento viscoelástico de algunos fluidos que necesitan grandes tasas de cizalla. (Barnes, 1989)

Figura 11.

Reómetro capilar industrial



Nota. Tomado de (Direct Industry, 2020)

Reómetro de cono y placa

Este tipo de reómetros en su estructura constan de una placa horizontal donde se coloca el fluido a ensayar y un cono conectado a un eje de torsión que al girar mide la fuerza de resistencia de flujo. (Barnes, 1989)

Figura 12.

Reómetro de cono y placa



Nota. Tomado de (Direct Industry, 2020)

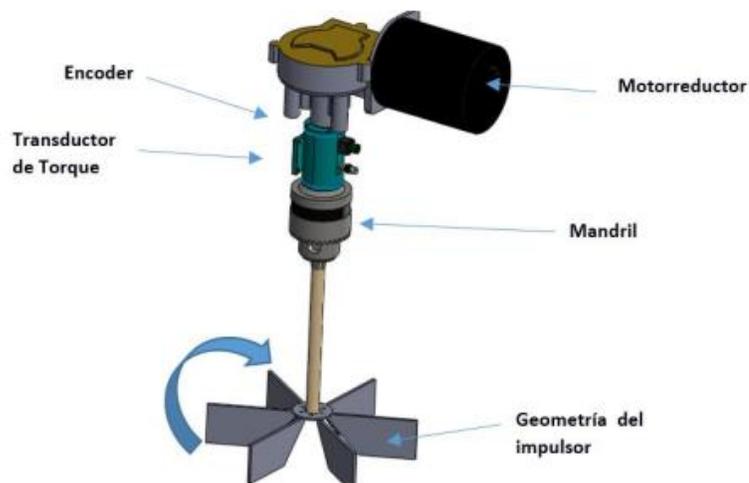
Reómetro rotacional de paletas

Los reómetros rotacionales tienen un funcionamiento basado en la resistencia a la torsión proporcionada por el fluido, en el que se sumerge un husillo giratorio con una característica definida, en este caso una geometría de paleta. A partir de las mediciones obtenidas del par y la velocidad de rotación del husillo, se pueden obtener lecturas de la viscosidad del fluido y las propiedades reológicas. (Coussot, 2005)

El prototipo de reómetro de hormigones autocompactantes corresponde a este tipo de reómetro rotacional.

Figura 13.

Esquema del mecanismo del prototipo de reómetro de hormigones



Nota. Tomado de (Gómez & Paredes, 2020)

Este tipo de reómetros se rigen a los fundamentos de flujo de Couette, por tal razón la velocidad de cizalla y el esfuerzo de corte se determinan en función de las dimensiones geométricas de los elementos constitutivos del reómetro, la velocidad de giro del husillo y fuerza de torsión respectivamente. Las ecuaciones que establecen las variables para análisis reológicos son las siguientes:

- *Velocidad de cizalla:* medida que determina la velocidad de variación de la deformación.

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \omega R_o^2}{R_o^2 - R_i^2}$$

Donde:

$\dot{\gamma}$: velocidad de corte o cizalla [1/s]

ω : velocidad de giro del husillo [rad/s]

R_o : radio del recipiente [m]

R_i : radio de la geometría [m]

- *Esfuerzo cortante*: definido como la fuerza por unidad de área que se necesita para alcanzar cierta deformación.

$$\tau = \frac{T}{2 \pi h R_i^2}$$

Donde:

τ : esfuerzo cortante o de cizalla [Pa]

T: torque [Nm]

R_i : radio del vano [m]

h: distancia entre la geometría y el fondo del recipiente [m]

- *Viscosidad aparente*: resulta del cociente entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de corte.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Donde:

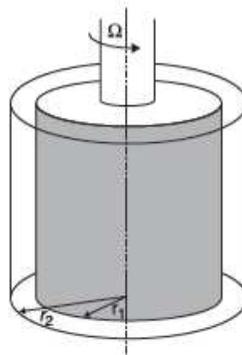
η : viscosidad aparente [Pa.s]

τ : esfuerzo cortante o de cizalla [Pa]

$\dot{\gamma}$: velocidad de corte o cizalla [1/s]

Figura 14.

Geometría de flujo de Couette



Nota. Tomado de (Coussot, 2005)

Reómetro absoluto Discovery HR2 TA

El reómetro híbrido Discovery cuenta con una serie de tecnologías modernas que ofrecen además de un buen rendimiento, un control de deformación directo, un control de tensión directa y una medición exacta de la fuerza normal, brindando mediciones sensibles, precisas y con excelente reproducibilidad. Este reómetro incluye todas las geometrías de su patente y una extensa posibilidad de configuraciones de temperatura. (TA Instruments, 2019)

El equipo posee tecnología de control activo de la temperatura (ATC) que permite mediciones de temperatura en tiempo real, velocidad de respuesta más rápida y una alta capacidad de cambio de temperatura. Dispone de varios accesorios para administrar la transferencia de calor con el fluido de estudio, cada sistema de temperatura ya sea tipo Peltier o tipo horno, ofrece comodidad y versatilidad de uso. (TA Instruments, 2019)

Figura 15.

Reómetro híbrido Discovery DHR2 TA



Nota. Tomado de (TA Instruments, 2019)

Este equipo se encuentra en el Laboratorio de Reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, el cual se usa para realizar mediciones de los fluidos no newtonianos a analizar y posteriormente comparar los resultados de las mediciones obtenidas con el prototipo de reómetro de campo para ser compensadas y conseguir datos de medición más exactos.

Figura 16.

Copa ranurada y vano rotativo para geometría de cilindros concéntricos



Nota. Tomado de (TA Instruments, 2019)

El equipo cuenta con varios tipos de geometrías como la cono y plato, platos paralelos, torsión rectangular y la geometría de vanos (Figura 16) que se usará para ejecutar los ensayos teóricos ya que el prototipo de reómetro cuenta con el mismo mecanismo.

Transferencia de calor

Antes de definir a la transferencia de calor, es importante conocer que el término calor se refiere a una forma de energía que es posible transmitir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura. (Cengel, 2011)

La transferencia de calor es considerada como un fenómeno físico en el cual, la energía térmica o calórica contenida en un sistema termodinámico se transfiere de un medio a otro, de modo que, al estar dos medios con diferentes temperaturas en contacto, se genera un flujo de calor desde el punto de temperatura más alta hasta el punto de temperatura más baja. (Incropera, 1999)

Tipos de transferencia de calor

Conducción

La conducción ocurre cuando la transferencia de calor es mediante el contacto directo de un medio con otro sin transferir materia entre ellos o también ocurre a través de un mismo cuerpo por el movimiento de sus moléculas cargadas de energía. La razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica del medio, el espesor, el material de construcción y la diferencia de temperatura existente. (Holman, 1999)

La expresión matemática simplificada que describe la razón de conducción esta descrita por la Ley de Fourier de la conducción de calor.

$$\dot{Q}_{cond1} = \frac{kA}{x}(T_1 - T_2)$$

Donde:

\dot{Q}_{cond1} : flujo de calor transmitido por conducción en una pared plana [W]

K: conductividad térmica [$W/m\ ^\circ C$]

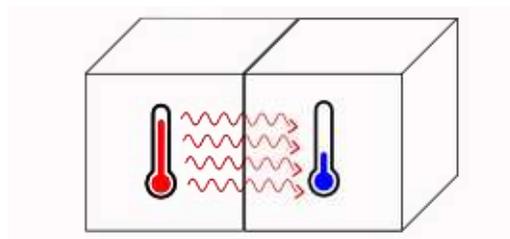
A: área de superficie de contacto [m^2]

x: espesor del material [m]

$(T_1 - T_2)$: diferencia de temperatura entre el lado caliente y el frio [$^\circ C$]

Figura 17.

Flujo de calor por conducción en paredes planas



Esta expresión es aplicable cuando la conducción de calor sucede a través de una pared plana de forma unidireccional, sin embargo, el calor también puede conducirse a través de paredes cilíndricas (tuberías), lo que implica una modificación en la expresión matemática.

$$\dot{Q}_{cond2} = \frac{2\pi Lk(T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)}$$

Donde:

\dot{Q}_{cond2} : flujo de calor transmitido por conducción en cilindros [W]

K: conductividad térmica [$W/m\ ^\circ C$]

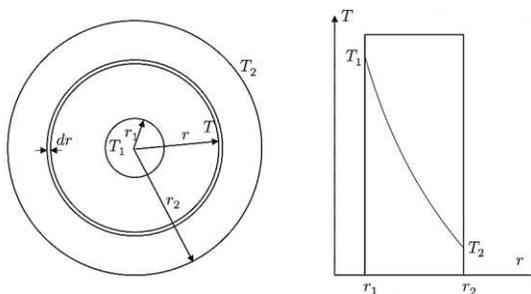
L: longitud del cilindro [m]

r_2/r_1 : relación entre radio exterior e interior del cilindro

$(T_1 - T_2)$: diferencia de temperatura entre el lado caliente y el frío [$^\circ C$]

Figura 18.

Conducción de calor en un cilindro



Nota. Tomado de (Domingo, 2011)

Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad constitutiva de ciertos materiales que determina la capacidad de transmitir calor, generalmente se representa con la letra “k”. Se determina midiendo la velocidad a la cual el calor atraviesa un material, mientras más elevada es la tasa de propagación de energía térmica, mejor traslada el calor dicho material (Kreith, 2012).

Figura 19.**Conductividad térmica de algunos materiales**

Material	λ W/(m K)	Material	λ W/(m K)
Acero	47 - 58	Hielo	2
Acero inoxidable	12 - 45	Hierro	80,2
Agua	0,58	Hormigón	1,7
Aire	0,025	Ladrillo	0,80
Alcohol	0,16	Ladrillo refractario	0,47 - 1,05
Alpaca	29,1	Latón	81 - 116
Aluminio puro	237	Litio	301,2
Amianto	0,04	Madera	0,04 - 0,4
Bronce	116 - 186	Mercurio	83,7
Caucho	0,16	Mica	0,35
Cemento Portland	0,29	Níquel	52,3
Cinc	106 - 140	Oro	318
Cobre	401	Parafina	0,21
Corcho	0,03 - 0,04	Piedra arenisca	2,4
Diamante	900 - 2300	Plata	429
Estaño	64,0	Plomo	35,0
Fibra de vidrio	0,03 - 0,07	Polipropileno	0,12
Glicerina	0,29	Tierra húmeda	0,8
Helio (superfluidez)	infinito	Vidrio	0,6 - 1,1

Conductividad Térmica λ (lamda)
Unidad = W/(K.m) (vatios por Kelvin y metro)

Nota. Tomado de (Zapata, 2019)

Convección

La convección es una forma de transmisión de calor por medio del movimiento de un fluido, sucede cuando dicho fluido recibe calor y sus partículas se mueven para transmitirlo dentro del espacio que ocupa. También se considera convección al intercambio de energía calórica entre una superficie sólida y un fluido. Se dice que la convección es forzada cuando el fluido es obligado a fluir sobre una superficie debido a la acción de medios externos y se conoce como convección natural cuando el movimiento del fluido se debe a la diferencia de densidades provocado por la variación de temperatura en el fluido. (Holman, 1999)

La transferencia de calor por convección se expresa convenientemente con la Ley del enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q}_{conv} = h A_s (T_s - T_i)$$

Donde:

\dot{Q}_{conv} : flujo de calor transmitido por convección [W]

h : coeficiente de convección [$W/m^2 \text{ } ^\circ C$]

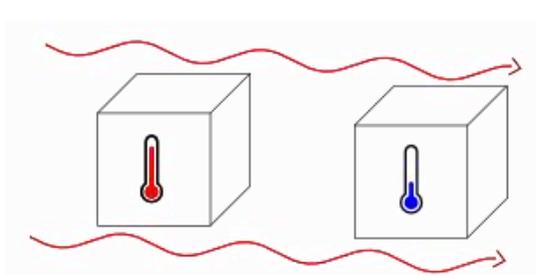
A : área superficial de contacto con el fluido [m^2]

T_s : temperatura en la superficie del cuerpo [$^\circ C$]

T_i : temperatura del fluido lejos del cuerpo [$^\circ C$]

Figura 20.

Transferencia de calor por convección



Nota. Tomado de (de Casajuana, 2005)

Radiación

En este tipo de transferencia de calor el flujo de energía ocurre sin contacto entre los medios debido a la emisión de ondas electromagnéticas de un cuerpo cargado de energía calórica (Holman, 1999).

La razón de radiación emisible desde una superficie cargada de energía calórica a una temperatura termodinámica hacia un medio circundante es enunciada por la Ley de Stefan-Boltzman:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma_{rad} A_s (T_s^4 - T_a^4)$$

Donde:

\dot{Q}_{rad} : flujo de calor transmitido por radiación [W]

σ_{rad} : constante de Boltzman $\sigma_{rad} = 5,67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$

ε : emisividad de la superficie

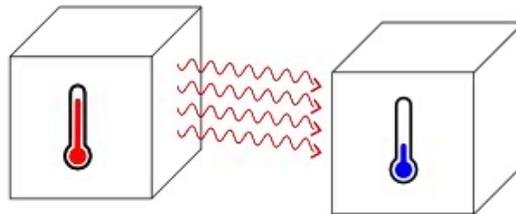
A_s : superficie del medio [m^2]

T_s^4 : temperatura de la superficie [$^\circ C$]

T_a^4 : temperatura del medio circundante [$^\circ C$]

Figura 21.

Transferencia de calor por radiación



Nota. Tomado de (de Casajuana, 2005)

Calor específico

El calor específico es conceptualizado como una medida de la capacidad que presentan los materiales para almacenar energía térmica o con una definición más técnica, es la cantidad de calor que se necesita suministrar a un cuerpo o sustancia por unidad de masa para aumentar un grado a su temperatura. (Cengel, 2011)

La siguiente expresión permite calcular el calor específico:

$$c_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$$

Donde:

c_p : calor específico [$J/kg^\circ C$]

Q : cantidad de calor transferido [J]

m : masa del cuerpo o sustancia [kg]

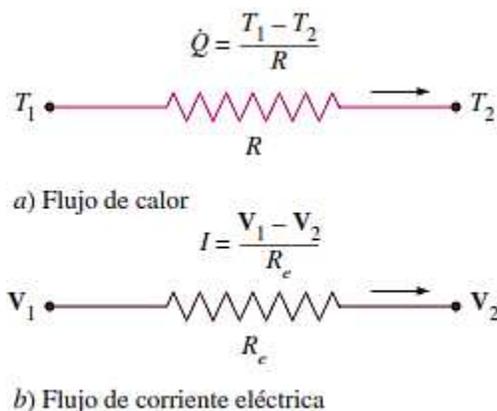
ΔT : variación de temperatura [$^\circ C$]

Tabla 4.*Calor específico de algunos materiales*

Material	Calor específico [kJ/kg°C]
Agua (líquida)	4,186
Aluminio	0,896
Acero galvanizado	0,461
Hormigón	0,880
Melaza	2,093
Aire seco	1,015
Arena	0,820

Resistencia térmica

La resistencia térmica se toma como una analogía de la resistencia eléctrica, considerada como el recíproco de la conductividad térmica, es decir, como una medida de la resistencia que presentan los materiales ante el flujo de energía calórica. Es útil para determinar la propiedad de aislamiento térmico y calcular la transferencia de calor a través de los materiales que conforman un sistema termodinámico. (Cengel, 2011)

Figura 22.*Equivalencia conceptual de resistencia térmica y eléctrica*

Nota. Tomado de (Cengel, 2011)

En la Figura 22, se presenta la ecuación de cálculo de la cantidad de calor que se transmite entre dos puntos a diferente temperatura usando la resistencia térmica (R). Las expresiones matemáticas para hallar la resistencia térmica se derivan de las fórmulas de los tipos de transferencia de calor como se enuncian en la Tabla 5.

Tabla 5.

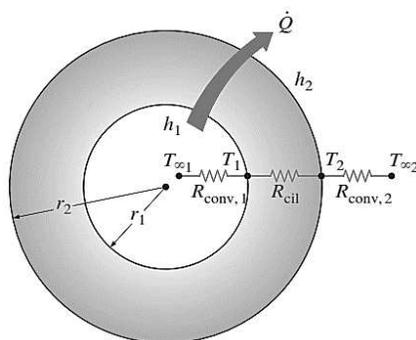
Expresiones matemáticas para calcular la resistencia térmica

MODO DE TRANSFERENCIA DE CALOR	FÓRMULA
Conducción por paredes planas	$R_{pared} = \frac{x}{kA}$
Conducción por paredes cilíndricas	$R_{cil} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk}$
Convección	$R_{conv} = \frac{1}{hA_s}$
Radiación	$R_{conv} = \frac{1}{\varepsilon\sigma_{rad}A_s} = \frac{1}{h_{rad}A_s}$

Cuando la energía térmica debe atravesar varias capas de materiales o medios diferentes, se halla el valor de la resistencia total sumando las magnitudes de resistencia térmica de cada material. (Cengel, 2011)

Figura 23.

Red de resistencias térmicas en paredes cilíndricas



$$R_{total} = R_{conv,1} + R_{cil} + R_{conv,2}$$

Nota. Tomado de (Cengel, 2011)

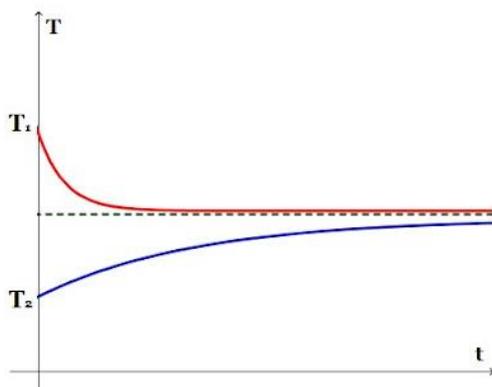
Equilibrio térmico

Se define al equilibrio térmico como un estado cuando las magnitudes de temperatura macroscópicas de uno o varios cuerpos en contacto no varían con el tiempo, es decir que el calor se transfiere entre ellos hasta que se igualan las temperaturas. (Camaraza, 2020)

Un proceso es isotérmico cuando la temperatura de un sistema se mantiene constante, sin importar la dinámica de dicho proceso, la transferencia de calor en el sistema ocurre a muy baja velocidad manteniendo un equilibrio térmico (Camaraza, 2020).

Figura 24.

Representación gráfica del proceso de equilibrio térmico



En la Figura 24, se mostró la evolución de la temperatura en el transcurso del tiempo de dos cuerpos en contacto hasta llegar a un equilibrio térmico.

Entalpía

La entalpía es una magnitud que describe la cantidad de energía calórica que un sistema termodinámico es capaz de ceder o absorber a otro medio en condiciones de presión constante. Generalmente se representa con la letra “h” y es un factor importante para los sistemas de intercambio de calor, como por ejemplo en ciclos de refrigeración. (Incropera, 1999)

Refrigeración

La refrigeración se define como la remoción de energía calórica de una materia o sustancia para llevarla o mantenerla a una temperatura relativamente inferior a la temperatura

ambiente, por lo que generalmente se conceptualiza a la refrigeración como un proceso de enfriamiento. (Whitman, 2006)

Modos de operación de los sistemas de refrigeración

Los sistemas de refrigeración pueden operar de distinta manera, según como circule el refrigerante y la distribución de los elementos que lo conforman.

Sistema de refrigeración directa

En este tipo de sistemas de refrigeración el fluido refrigerante está en constante recirculación dentro del sistema que se necesita enfriar. (Nimbriotis, 1994)

Sistema de refrigeración indirecta

Los sistemas de refrigeración indirecta utilizan un fluido como refrigerante el cual realiza un solo recorrido por el sistema y también sirve como producto o materia prima fuera del proceso de refrigeración. (Nimbriotis, 1994)

Independientemente del tipo de operación del sistema de refrigeración, directa o indirecta, pueden describirse según el tipo de ciclo, ya sea un ciclo simple donde el conjunto de componentes del sistema forma un único ciclo de refrigeración o un ciclo compuesto o en cascada donde se emplean más componentes de los habituales debido a que forman dos o más ciclos conjuntos. (Nimbriotis, 1994)

Métodos de refrigeración

Los métodos de refrigeración termoeléctrica, de chorro de vapor y por ciclo de aire se utilizan para aplicaciones especiales, ya sea por su costo o eficiencia. A diferencia del método de refrigeración por absorción y el sistema de compresión de vapor que son los métodos generalmente más usados. (Pita, 1991)

Refrigeración por absorción

La refrigeración mecánica por absorción es un proceso que evapora un líquido refrigerante que al cambiar de estado absorbe el calor de otra sustancia. Este método tiene como

particularidad que, en su ciclo empujado por un compresor, existe un fluido que absorbe y desprende el refrigerante para reducir su temperatura. (Pita,1991)

Sistema de compresión de vapor

Un sistema de compresión de vapor o sistema de refrigeración básico sirve para disminuir la temperatura de un objeto aplicando transferencia de calor. Este proceso mecánico cuenta con un compresor en su estructura, encargado de la circulación de un líquido refrigerante volátil a través de un circuito cerrado. El refrigerante es manipulado para que cambie continuamente de estado líquido a gaseoso en el ciclo de refrigeración, absorbiendo calor en el evaporador y expulsándolo a través del condensador. (Pita,1991)

El método de refrigeración mencionado es el que se aplica en el proyecto de investigación, razón por la cual se detallan sus principales componentes y su funcionamiento.

Funcionamiento del sistema de refrigeración por compresión de vapor

Un sistema de refrigeración por compresión consta de cuatro elementos fundamentales; compresor, evaporador, condensador y el dispositivo de expansión o control de flujo. Todos los componentes trabajan en conjunto formando un ciclo cerrado y cada elemento cumple una función específica para asegurar el funcionamiento continuo del sistema de refrigeración. (Franco, 2006)

A continuación, se detalla la función principal que cumple cada elemento dentro del sistema de compresión de vapor.

Compresor

El compresor es el actuador principal del ciclo de refrigeración, su función es aspirar el refrigerante en forma de gas a baja presión y luego lo comprime, aumentando la presión y temperatura hasta ciertos valores para sea posible la condensación. El refrigerante es enviado al condensador a través de la válvula de descarga. (Franco, 2006)

Condensador

En el condensador se encarga de transformar el gas refrigerante a estado líquido y de disipar el calor producido en el sistema hacia el medio ambiente. Durante la condensación ingresa el refrigerante en forma de vapor recalentado para ser enfriado y sale en estado líquido a la temperatura de condensación o menor. (Franco, 2006)

Dispositivo de expansión

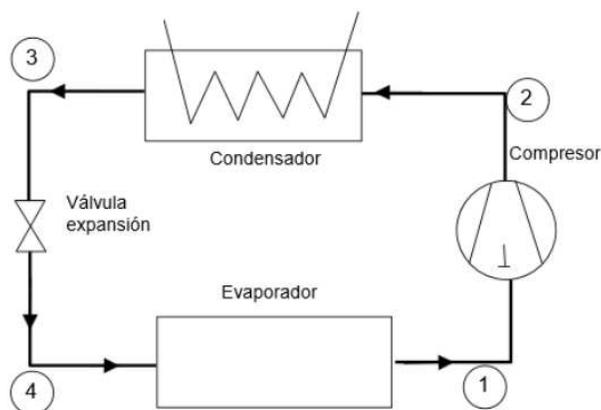
La función del dispositivo de expansión es regular lo que ocurre con el fluido refrigerante entre el condensador y el evaporador. Produce una caída de presión y temperatura necesaria para que ingrese el refrigerante al evaporador en condiciones y cantidad adecuada. (Franco, 2006)

Evaporador

El evaporador es el elemento responsable de sustraer la energía calórica del objeto o sistema a enfriar a través del refrigerante. En el proceso de evaporación el refrigerante cambia de estado de líquido a gas debido a la diferencia de temperaturas existente, en este caso, entre el fluido de estudio contenido en el recipiente de almacenamiento y el fluido refrigerante que absorbe el calor. (Franco, 2006)

Figura 25.

Ciclo de refrigeración del sistema de compresión de vapor



Nota. Tomado de (Arnabat, 2007)

Refrigerantes

Básicamente un refrigerante es una sustancia cuya función es sustraer el calor de otra sustancia o cuerpo y transportarlo a otra sección. Específicamente hablando de refrigeración mecánica se define al refrigerante como el medio para absorber calor en el evaporador y liberar calor en el condensador con rangos específicos de presiones y temperaturas de trabajo. Para que una sustancia sea denominada refrigerante debe cumplir con ciertas propiedades termodinámicas y físicas que caracterizan a cada refrigerante brindando criterios de selección para ser usados en determinadas aplicaciones. (Whitman, 2006)

Clasificación de los refrigerantes

Existe una amplia variedad de fluidos refrigerantes por lo que es adecuado clasificarlos en distintas categorías.

Clasificación según su composición química

Generalmente se clasifican los refrigerantes por su composición química los cuales son; inorgánicos como el agua o el amoníaco, orgánicos que se subdividen en halocarbonos e hidrocarburos y mezclas que pueden ser azeotrópicas o zeotrópicas. En la Figura 26, se presentan algunos fluidos refrigerantes clasificados por su composición química. (SEMARNAT, 2007)

Figura 26.

Clasificación de los refrigerantes según su composición química

No.	NOMBRE QUIMICO	FORMULA QUIMICA	No.	NOMBRE QUIMICO	FORMULA QUIMICA
	Serie Metano			Compuestos Inorgánicos	
10	Tetraclorometano (tetracloruro de carbono)	CCl ₄	702	Hidrógeno	H ₂
11	Tricloromonofluorometano	CCl ₃ F	704	Helio	He
12	Diclorodifluorometano	CCl ₂ F ₂	717	Amoníaco	NH ₃
13	Clorotrifluorometano	CClF ₃	718	Agua	H ₂ O
20	Triclorometano (cloroformo)	CHCl ₃	720	Neón	Ne
21	Diclorofluorometano	CHCl ₂ F	728	Nitrógeno	N ₂
22	Clorodifluorometano	CHClF ₂	732	Oxígeno	O ₂
23	Trifluorometano	CHF ₃	744	Bióxido de Carbono	CO ₂
30	Diclorometano (cloruro de metileno)	CH ₂ Cl ₂	764	Bióxido de Azufre	SO ₂
40	Clorometano (cloruro de metilo)	CH ₃ Cl			
50	Metano	CH ₄		Mezclas Zeotrópicas	
	Serie Etano		400	R-12/114 (60/40)	
110	Hexacloroetano	CCl ₃ CCl ₃	401A	R-22/152a/124 (53/13/34)	
113	1,1,2-triclorotrifluoroetano	CCl ₂ FCClF ₂	401B	R-22/152a/124 (61/11/28)	
115	Cloropentafluoroetano	CClF ₂ CF ₃	402A	R-22/125/290 (38/60/2)	
123	2,2-Dicloro - 1, 1, 1-Trifluoroetano	CHCl ₂ CF ₃	402B	R-22/125/290 (60/38/2)	
134a	1, 1, 1, 2-Tetrafluoroetano	CH ₂ FCF ₃	404A	R-125/143a/134a (44/52/4)	
141b	1, 1-Dicloro-1-fluoroetano	CH ₃ CCl ₂ F	407A	R-32/125/134a (20/40/40)	
150a	1, 1-Dicloroetano	CH ₃ CHCl ₂	407B	R-32/125/134a (10/70/20)	
152a	1, 1-Difluoroetano	CH ₃ CHF ₂	407C	R-32/125/134a (23/25/52)	
160	Cloroetano (cloruro de etilo)	CH ₃ CH ₂ Cl	408A	R-125/143a/22 (7/46/47)	
170	Etano	CH ₃ CH ₃	409A	R-22/124/142b (60/25/15)	
	Hidrocarburos		410A	R-32/125 (50/50)	
290	Propano	CH ₃ CH ₂ CH ₃		Mezclas Azeotrópicas	
600	Butano	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃	500	R-12/152a (73.8/26.2)	
600a	2-Metilpropano (isobutano)	CH(CH ₃) ₃	502	R22/115 (48.8/51.2)	
			503	R-223/13 (40.1/59.9)	
			507	R-125/143a (50/50)	

Nota. Tomado de (INDUVEL, 2019)

Clasificación por su inflamabilidad y su toxicidad

El reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias en el Real Decreto 552/2019 especifica que los refrigerantes deben clasificarse en función de los efectos que producen sobre la salud, la contaminación ambiental y la seguridad, por ello se agrupan según su capacidad de inflamabilidad y toxicidad. (Renedo, 2011)

- *Por su inflamabilidad:* en esta agrupación se definen tres categorías (1, 2 y 3) según la capacidad de propagación de llama que poseen.
- *Por su toxicidad:* los refrigerantes se dividen en dos categorías (A y B) según la concentración y el tiempo de exposición que el personal de trabajo puede soportar sin efectos adversos.

En la Tabla 6, se muestra la clasificación por seguridad de los refrigerantes y algunos ejemplos en función de la inflamabilidad y toxicidad.

Tabla 6.

Clasificación de los refrigerantes por su seguridad

	BAJA TOXICIDAD <i>TLV > 400 PPM</i>	ALTA TOXICIDAD <i>TLV < 399 PPM</i>
INFLAMABILIDAD ALTA	A3 R-290 R-600a R-1270	B3 Cloruro de vinilo
INFLAMABILIDAD MEDIA	A2 R-412b R-152a R-32 R410a	B2 Amoniaco R-717
INFLAMABILIDAD BAJA	A1 R-22 R-134a R-744 R-404a	B1 R-123

Diagrama de Mollier

El diagrama de Mollier puede representarse mediante una tabla o grafica útil para efectuar los cálculos de refrigeración, en la cual se representan las condiciones del refrigerante en cualquier estado termodinámico y en cualquier punto del ciclo. También es conocido como diagrama P-h o, ya que muestras las propiedades de presión y entalpia del refrigerante. Es importante mencionar que cada fluido refrigerante tiene su propio diagrama. (Pita, 1991)

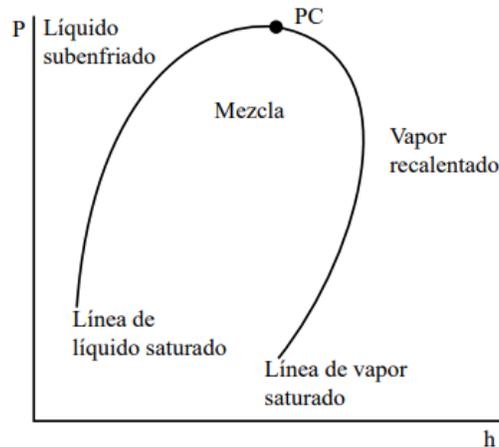
La gráfica de la Figura 27, es de gran ayuda para conocer las líneas que delimitan las zonas que intervienen en un diagrama de Mollier para saber manejarlo. (Ramírez, 2007)

- En la línea de líquido saturado y en su parte izquierda (líquido subenfriado) el refrigerante se encuentra en estado líquido.

- En la línea de vapor saturado y en su parte derecha (vapor recalentado) el refrigerante se encuentra en estado gaseoso.
- En la zona de mezcla ubicada entre las dos líneas, el refrigerante se encuentra en estado líquido y gaseoso.
- El punto de unión de las líneas (punto crítico) se ubican los valores de presión y temperatura crítica.

Figura 27.

Zonas y delimitaciones características del diagrama de Mollier



Nota. Tomado de (Franco, 2006)

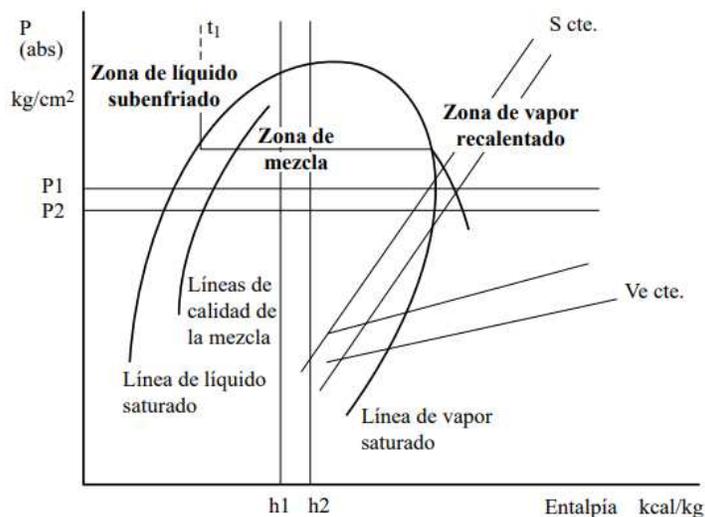
La gráfica de la Figura 28, muestra las líneas de los parámetros que proporcionan información de estado del sistema de refrigeración. (Ramírez, 2007)

- En el eje de ordenadas se ubican los valores de presión absoluta (P_1 y P_2).
- En el eje de abscisas se encuentran las escalas de las entalpías (h_1 y h_2).
- Líneas de temperatura (t_1, t_2, \dots), indican la temperatura del refrigerante.
- Líneas de volumen específico (v_e), proporcionan información para determinar el desplazamiento volumétrico del compresor.
- Líneas de entropía (S), determinan la fase de compresión.

- Líneas de calidad de la mezcla (10,20...), indican la proporción de la mezcla del refrigerante en estado líquido y gaseoso.

Figura 28.

Parámetros del diagrama p-h de un refrigerante



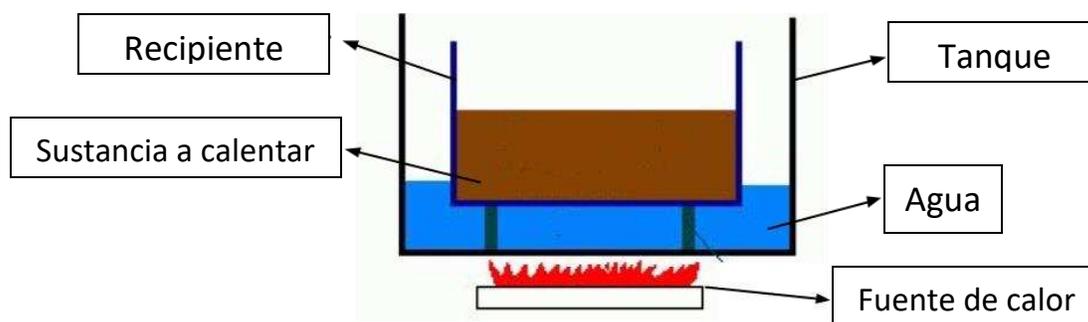
Nota. Tomado de (Franco, 2006)

Método de calentamiento por baño maría

El calentamiento por baño maría consiste en un recipiente lleno generalmente de agua caliente, para elevar la temperatura de otro recipiente más pequeño que se encuentra sobre el agua caliente. En el recipiente más pequeño se coloca la sustancia a calentar indirectamente con la energía térmica transferida por el agua caliente. Los equipos de baño maría cuentan con un control electrónico para administrar la temperatura del agua o de la sustancia a calentar. (Guayasamín & Molina, 2022)

Figura 29.

Esquema del calentamiento por baño maría



El baño maría es utilizado tanto en la industria como en laboratorios, dependiendo de la aplicación, se utilizan diferentes fluidos para elevar la temperatura del recipiente almacenador. En aplicaciones que necesitan temperaturas inferiores a los 100°C se usa agua y para temperaturas superiores se utiliza silicona, arena o aceite. (Guayasamín & Molina, 2022)

Modelos matemáticos de ajuste

Ajuste de curvas

Ajustar una curva consiste en hallar una ecuación que contenga una serie de datos (x,y) obtenidos de alguna prueba o experimentación, útil para conocer valores intermedios desconocidos o conseguir una función simplificada que se ajuste a determinados valores discretos. (Romero, 2007)

Existen dos métodos de ajuste de curvas que se aplican según el conjunto de par de datos que se tenga. Si se tiene datos poco exactos asociados con factores de ruido resultado de una experimentación se establece una sola representación gráfica aproximada y se aplica un método de regresión, caso contrario se aplica el método de interpolación. Al tener datos precisos se traza una curva que pasa por cada dato discreto, estas metodologías son provechosas para análisis de tendencia o pruebas de hipótesis. (Romero, 2007)

Análisis de regresión

Los datos reológicos que proporciona el prototipo de reómetro de campo son experimentales, por tal razón para trazar la curva de flujo debe aplicarse un método de regresión. Para valerse de un modelo adecuado de regresión previamente se utiliza una herramienta estadística llamada análisis de regresión que considera la correlación entre las variables cuantitativas dependiente e independientes para hallar una relación matemática. (Sánchez, 2016)

Regresión polinomial

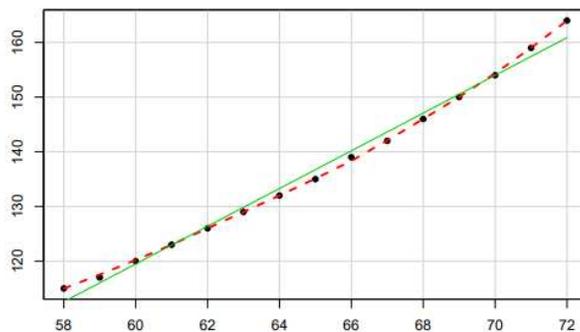
Existen variados modelos de regresión que se aplican dependiendo de las variables que se maneje, en el caso de estudios reológicos de fluidos no newtonianos se conoce que la interacción entre el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación es no proporcional, por lo que es prudente aplicar un modelo de regresión polinomial que relaciona la variable cuantitativa dependiente con la independiente con un modelo de función polinomial de orden n . (Vinuesa, 2016)

Método de mínimos cuadrados

El método de mínimos cuadrados es una técnica de regresión lineal o polinomial que conlleva una serie de procedimientos que permiten aproximar una función a un conjunto de datos experimentales. Es uno de los métodos más usados y el desarrollo del método se puede realizar mediante fórmulas matemáticas o utilizando un software computacional. (Vinuesa, 2016)

Figura 30.

Ejemplo de ajuste lineal (línea verde) y ajuste cuadrático polinomial (línea roja) por el método de mínimos cuadrados



Nota. Tomado de (Vinuesa, 2016)

Capítulo 3: Diseño y selección de componentes mecánicos y electrónicos

En el campo ingenieril existen varias metodologías de diseño que brindan una guía de desarrollo de procesos estableciendo formas y recomendaciones que potencien la eficiencia en el diseño de un producto o prototipo. Para el desarrollo del proyecto de investigación se opta por la aplicación de la norma VDI 2206 y la metodología de Gugelot dada su viabilidad, ya que ambas proporcionan un marco sólido y estructurado para el proceso de diseño mecatrónico, impulsando así la eficiencia y la calidad de los resultados finales con un enfoque en el diseño del producto en base a los requerimientos del cliente, en este caso los usuarios del prototipo en el Laboratorio de Reología.

La norma VDI 2206 es una guía que describe el procedimiento de diseño de sistemas técnicos y su integración en los procesos de producción. Esta norma establece una metodología estructurada que abarca desde la planificación hasta la puesta en marcha de un sistema técnico, incluyendo la evaluación y el control del proceso. La metodología de diseño de Hans Gugelot, por otro lado, se centra en el diseño de productos y se basa en la idea de que el diseño debe ser funcional, simple y económico. Ambas metodologías comparten la idea de que el diseño debe ser un proceso estructurado y sistemático que abarque todas las fases del proyecto, desde las ideas de diseño hasta la producción. Tanto la norma VDI 2206 como la metodología de diseño de Hans Gugelot comparten una perspectiva sistemática y estructurada del proceso de diseño, lo que las hace viables para ser aplicadas en el proyecto de investigación. La combinación de ambas metodologías resulta ser una estrategia efectiva para lograr un diseño óptimo en proyectos de mecatrónica que involucren la integración de tecnologías y la producción de productos, en este caso el mejoramiento del prototipo de reómetro. (Diaz & Bernal, 2016)

Tanto la norma como la metodología describen siete pasos para desarrollar el procedimiento de diseño, los cuales se conceptualizan en la continuación de este capítulo.

Información

En esta etapa se recolecta información referente al prototipo para ahondar el conocimiento sobre reómetros y los sistemas de transferencia de calor que los integren. Puntualmente se obtiene información del reómetro Discovery DHR2 existente en el laboratorio de reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, ya que con este equipo se efectúan mediciones referenciales para la calibración del prototipo. Dicha información se encuentra en el capítulo 2.

Investigación

En esta etapa se analizan los requisitos funcionales y técnicos del sistema, determinando las necesidades del usuario sobre el contexto del producto, aspectos funcionales y esenciales del sistema de transferencia de calor para el prototipo de reómetro.

Requerimientos del sistema de transferencia de calor

- Capacidad de mantener la temperatura del fluido de estudio en un rango determinado.
- Disponer de más de un punto de medición de temperatura.
- El recipiente almacenador del fluido de estudio debe ser extraíble.
- La construcción del sistema debe realizarse con materiales resistentes y duraderos.
- Todo el prototipo del reómetro, incluido el sistema de transferencia de calor, debe ser considerado transportable.
- El sistema de transferencia de calor debe funcionar de manera independiente en relación al sistema de potencia del prototipo de reómetro.
- Interfaz humano máquina amigable con el usuario e integrada en la existente.
- Visualización en tiempo real de la variación de la temperatura.
- Incorporar el sistema de transferencia de calor dentro de la estructura actual del prototipo de reómetro.

- Respetar las dimensiones de diseño del tanque contenedor y de la geometría del vano, así como también el diseño funcional del equipo.
- Almacenar los datos de las mediciones para posterior manipulación.
- Implementar un diseño que proporcione facilidad de mantenimiento y limpieza.
- Diseño práctico y funcional.

Especificaciones

En esta etapa se especifican los parámetros determinantes para el desarrollo del sistema de transferencia de calor y la cuantificación técnica de los rangos de acción.

- Capacidad de modificar y mantener la temperatura del fluido de estudio en un rango 20°C a 60°C.
- Situar 3 puntos de medición de temperatura en todo el sistema de transferencia de calor.
- Implementar instrumentación y actuadores robustos para obtener un prototipo resistente y duradero.
- Diseñar la interfaz humano-máquina de control y monitoreo de tal manera, que se integre en la interfaz de control existente.

Diseño

La fase de diseño corresponde al estudio tipológico de sistemas de transferencia de calor con apoyo en conocimientos científicos, realizando un análisis general de las características de los posibles dispositivos o mecanismos que pueden adaptarse al estado actual del prototipo de reómetro de campo, en base a las especificaciones y requerimientos para el diseño mecatrónico. En esta etapa se consideran y examinan las principales partes que conformarán el sistema general, tales como: diseño mecánico, diseño eléctrico electrónico y diseño de software y programación.

Con el fin de acertar en un adecuado diseño del sistema de transferencia de calor para el prototipo de reómetro y contar con buenos fundamentos para una posterior decisión de diseño final, se utiliza matrices de comparación de características para seleccionar el mecanismo o dispositivo de cada sección, tomando en cuenta que se aplicará el método de baño maría. La evaluación será sobre 5 puntos, siendo 1 el menor puntaje.

Diseño mecánico

El objetivo del sistema de transferencia de calor es mantener en una temperatura específica el fluido de estudio, por lo tanto, es preciso contar con dos subsistemas, uno que se encargue de elevar la temperatura del fluido y otro que sustraiga la energía térmica del mismo, ya sea que funcionen de manera combinada o independientemente según lo que se requiera. Mediante tablas de selección se analizan los posibles mecanismos que cumplirían las funciones de aportar y quitar calor.

Tabla 7.

Matriz de comparación y selección mecanismos de calentamiento

Requerimientos	Caldera a fuego directo	Termo resistencia eléctrica	Inducción electromagnética	Intercambiador de calor
Costo	4	5	2	2
Facilidad de instalación	3	4	4	1
Eficiencia	1	4	5	2
Potencia	4	3	5	4
Accesibilidad	4	5	3	3
Robustez	3	4	3	3
Total	19	25	22	15

En base a la Tabla 7, usar una termo resistencia eléctrica es lo más idóneo para el proyecto de investigación.

La generación de calor por resistencia eléctrica sucede cuando se hace circular corriente eléctrica por un material específico y esta no se transmite, sino se transforma en calor. Este tipo de mecanismo es bastante usado porque ofrece una forma de generar calor simple con pocos elementos y un control manejable debido a que la cantidad de calor que se genera depende de la proporción entre la resistencia del material conductor y la magnitud de la corriente aplicada.

Tabla 8.

Matriz de comparación y selección mecanismos de enfriamiento

Requerimientos	Máquina chiller	Placa Peltier	Refrigeración por compresión	Intercambiador de calor
Costo	1	2	5	3
Facilidad de instalación	2	4	3	2
Eficiencia	4	4	3	2
Potencia	5	2	4	3
Accesibilidad	2	2	4	3
Robustez	5	3	4	4
Total	19	17	23	17

La Tabla 8, expone que un sistema de refrigeración por compresión es el indicado para ser implementado en el prototipo de reómetro.

Diseño eléctrico electrónico

En esta sección se consideran los dispositivos eléctricos y electrónicos que podrían conformar el sistema de transferencia de calor para el prototipo de reómetro. Generalmente los

sistemas de este tipo cuentan con sensores de temperatura que son controlados por una tarjeta electrónica de adquisición de datos, por lo que a través de tablas de selección se comparan los posibles dispositivos.

Tabla 9.

Matriz de comparación y selección sensores de temperatura

Requerimientos	Termopar	RTD	Termistor
Costo	5	3	4
Accesibilidad	4	3	3
Robustez	5	3	2
Rango de medida	5	4	4
Linealidad	3	4	3
Precisión	3	4	3
Velocidad de respuesta	4	3	4
Repetibilidad	3	3	2
Tamaño	4	2	3
TOTAL	36	29	28

La matriz de la Tabla 9, muestra que un sensor de temperatura tipo termopar se adaptaría mejor a las condiciones de desarrollo del proyecto de investigación.

Los sensores de temperatura tipo termopar o termocupla están formados por dos alambres metálicos de diferente material que están unidos en sus extremos, que dependiendo la temperatura que percibe en la junta, cambia su diferencial de potencial.

Las principales ventajas de estos sensores es su robustez para resistir condiciones de trabajo severos pese a tener un tamaño reducido, son relativamente económicos y cuentan con

un amplio rango de temperatura de trabajo, aunque no ofrecen una medición lineal de la temperatura.

Tabla 10.

Matriz de comparación y selección controladores

Requerimientos	Arduino	Raspberry pi	PLC	myRIO
Costo	5	4	2	1
Accesibilidad	5	5	3	2
Aplicabilidad	5	3	2	3
Entradas digitales	4	4	5	5
Entradas análogas	4	4	5	5
Velocidad de procesamiento [Mhz]	2	3	4	5
Versatilidad	5	4	3	3
Robustez	3	2	4	5
TOTAL	33	29	28	29

En base a la Tabla 10, el controlador indicado para la aplicación es un Arduino, el cual mediante el uso de modulo, es compatible con los sensores y mecanismos seleccionados con anterioridad, además de coincidir con el controlador del sistema de potencia del prototipo de reómetro.

Arduino es una placa electrónica de adquisición de datos que intercambia información con un computador a través de conexión serial, es muy usado por su lenguaje de programación de código abierto, la gran cantidad de dispositivos con los que puede interactuar y su economía.

Decisión

En esta etapa se define el diseño final del prototipo en base a los requerimientos del usuario, especificaciones establecidas, estudio tipológico y el análisis general de características de mecanismos, realizado en distintas fases del modelo de diseño mecatrónico. Por lo que se decide que el sistema de transferencia de calor a implementarse en el prototipo de reómetro de campo en la parte mecánica contará con dos módulos que aportarán y restarán energía calórica a una cantidad determinada de agua, quien será el fluido encargado de transferir el calor, por el método de baño maría, a un recipiente almacenador del fluido de estudio.

El primer módulo conformado por una resistencia eléctrica que estará en contacto directo con el agua dentro del tanque contenedor del baño maría. El segundo módulo, un ciclo de refrigeración por compresión de vapor que rodee el tanque contenedor. La parte eléctrica electrónica de los módulos estará conformada por sensores de temperatura tipo termopar y el dispositivo que gestionará la adquisición de datos será un Arduino con módulos y componentes necesarios para asegurar la interacción de la parte mecánica con la electrónica, además de un relé térmico para proteger los dispositivos eléctricos. Finalmente, la interfaz humano-máquina se integrará dentro del ya existente, para el accionamiento y monitoreo del funcionamiento del sistema de transferencia de calor.

La decisión final de diseño se toma en base a la funcionalidad del sistema de transferencia de calor, la practicidad de implementar los elementos al estado actual del reómetro sin modificaciones significativas de la estructuración del equipo, respetando las relaciones geométricas del tanque de almacenamiento y el vano de su diseño original.

Cálculo

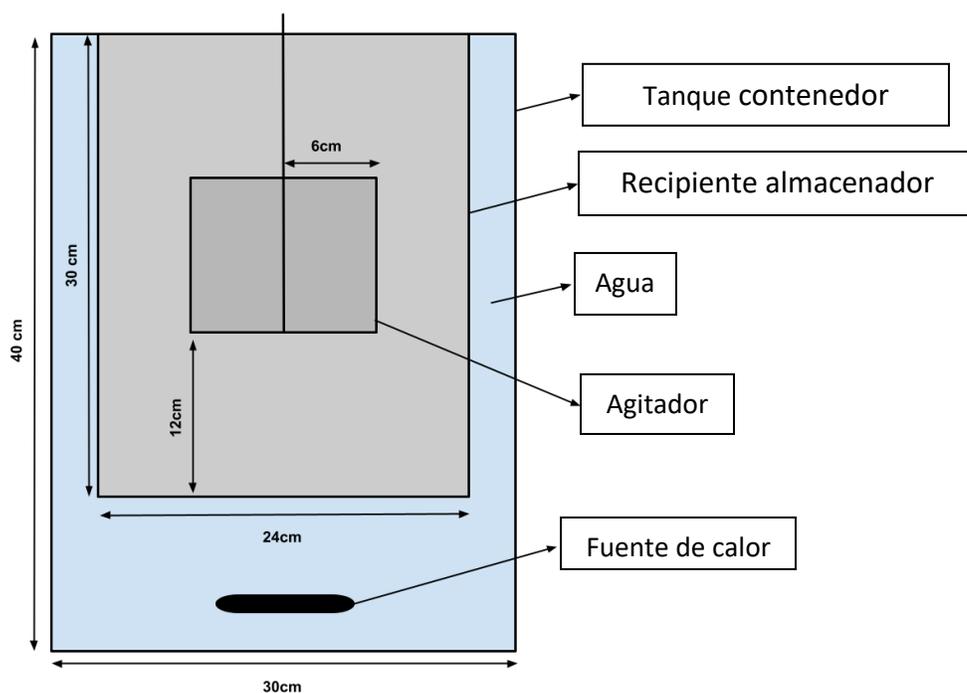
En esta etapa del diseño se determina específicamente los elementos y componentes que conformarán el sistema de transferencia de calor, enfocado en los materiales, mecanismos y la construcción del prototipo en base a la decisión final de diseño.

Diseño sistema baño maría

En la sección 2.24, se describe que un sistema de calentamiento por baño maría cuenta con dos recipientes, uno para contener el agua caliente y otro que almacena el fluido de estudio. Para adaptar un sistema de baño maría a la situación actual del reómetro, se diseña y construye otro tanque almacenador del fluido de estudio, respetando las consideraciones de diseño inicial y las proporciones geométricas del tanque contenedor y el vano impuestas en la construcción del reómetro.

Figura 31.

Esquema del baño maría y dimensiones de los recipientes cilíndricos



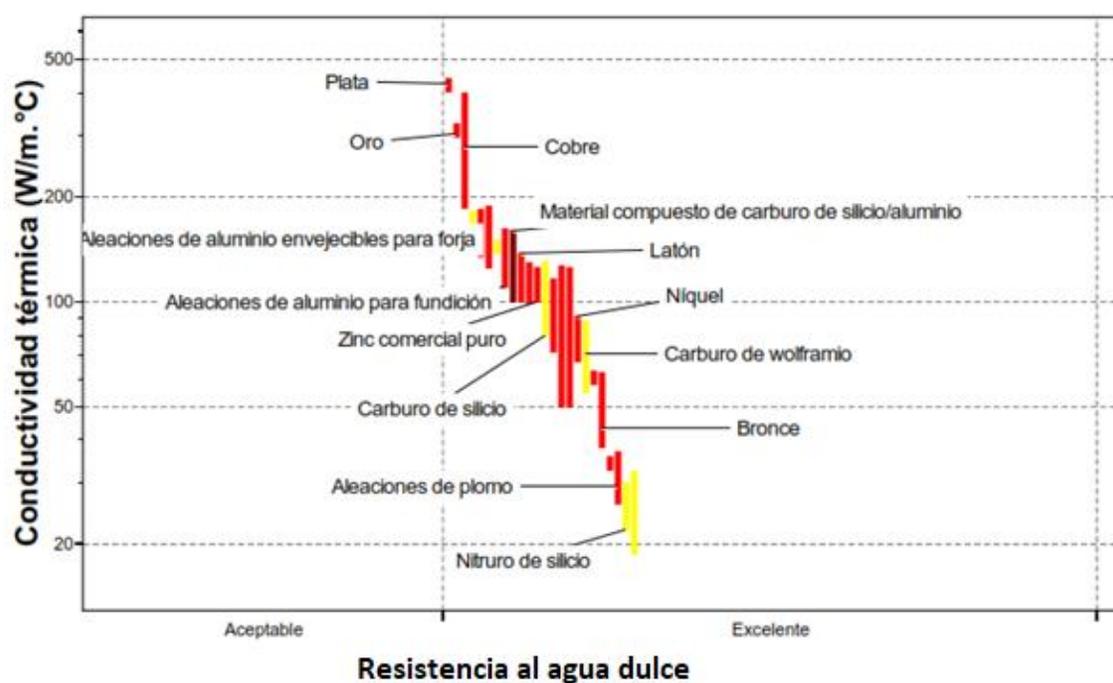
En la Figura 31, se presentan las medidas que tendrá cada depósito cuyos volúmenes son de 13,12 litros para el recipiente almacenador de la muestra de estudio y 11,62 litros para el tanque contenedor de agua. Con el valor de volumen de agua del tanque contenedor se puede calcular el balance energético en el proceso de calentamiento por baño maría.

Selección de material del recipiente almacenador

Es importante y fundamental que el material constitutivo del recipiente almacenador tenga propiedades térmicas favorables como una alta conductividad térmica y un bajo valor de calor específico, con el fin de transferir la energía térmica eficazmente al fluido de estudio y elevar su temperatura.

Figura 32.

Gráfica de conductividad térmica y resistencia al agua de materiales metálicos



Nota. Tomado de (CES EduPack, 2019)

En base a la información de la Figura 32, y una tabla de comparación de características se selecciona el material de construcción del recipiente almacenador.

Tabla 11.

Matriz de selección de material del recipiente almacenador del fluido de estudio

Requerimientos	Bronce	Latón	Aluminio	Cobre	Acero galvanizado
Conductividad térmica	2	3	5	5	2
Resistencia agua dulce	5	4	5	4	4
Robustez	4	4	5	4	3
Mecanizabilidad	3	3	5	4	5
Soldabilidad	2	4	4	3	4
Disponibilidad	2	3	5	3	5
Precio	2	3	4	2	5
TOTAL	20	21	33	25	28

El aluminio resulto ser el material metálico más adecuado para la aplicación, sus propiedades térmicas y generales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 12.

Propiedades térmicas y generales del aluminio

Conductividad térmica (k_{Al})	$209 \frac{W}{m^{\circ}C}$
Calor específico (cp_{Al})	$0,896 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C}$
Densidad (ρ_{Al})	$2,739 Kg/L$
Emisividad (ϵ)	0,08

Balance energético

En esta parte, se calcula la cantidad de energía calórica disponible para elevar la temperatura del fluido de estudio y como se transfiere a través de los materiales.

Calor necesario para hervir el agua (Q_i)

En el proceso de calentamiento que se llevará a cabo por el baño maría se requiere que el agua no cambie de fase para evitar pérdidas de masa por evaporación, para ello no se toma en cuenta el calor latente de fusión y se supone que el agua inicialmente está a temperatura ambiente. Los cálculos parten deduciendo la masa de agua.

$$\rho_{H2O} = \frac{m_{H2O}}{v_{H2O}}$$

Donde:

ρ_{H2O} : densidad del agua [kg/l]

m_{H2O} : masa del agua [kg]

v_{H2O} : volumen de agua[l]

$$m_{H2O} = \rho_{H2O} * v_{H2O}$$

$$m_{H2O} = 1 \frac{kg}{l} * 11,62 l$$

$$m_{mel} = 11,62 kg$$

El calor necesario se calcula a partir de la ecuación de calor específico:

$$\dot{Q}_i = m_{H2O} * cp_{H2O} * (T_i - T_f)$$

Donde:

\dot{Q}_i : energía térmica del agua [kW]

cp_{mel} : calor específico del agua [kJ/kg°C]

$T_i - T_f$: diferencial entre la temperatura inicial y final del agua [°C]

$$\dot{Q}_i = 11,62 kg * 4,186 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} * (92^\circ C - 17^\circ C)$$

$$\dot{Q}_i = 3648,1 \frac{kJ}{h} = 1013,36 W$$

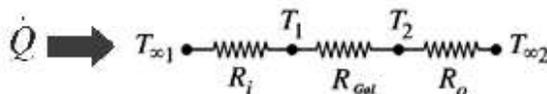
El valor de \dot{Q}_i es la cantidad de energía térmica útil para elevar la temperatura del fluido de estudio, por tal razón se considera como la energía de entrada en sistema de calentamiento por baño maría.

Flujo de calor a través del tanque contenedor (\dot{Q}_o)

La energía térmica que fluye a través del tanque contenedor de agua se considera como pérdida, ya que no contribuye para elevar la temperatura del fluido de estudio. El material del tanque es de acero galvanizado de 2mm de espesor y esta recubierto por una capa de lana de vidrio de 45mm de espesor. Los cálculos se desarrollan en base al concepto de resistencia térmica.

Figura 33.

Esquema de resistencias térmicas para el tanque contenedor de agua



Donde:

R_i : resistencia térmica del agua

R_{Gal} : resistencia térmica del acero galvanizado

R_o : resistencia térmica de la lana mineral

T_n : temperatura en los extremos de cada material

\dot{Q}_o : máximo calor perdido a través del tanque contenedor

$$R_i = \frac{1}{h_{H_2O} A_{H_2O.1}} = \frac{1}{\left(6000 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right) (2\pi \times 0,15m \times 0,35m)} = 0,000589 \text{ } ^\circ C/W$$

$$R_{Gal} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_{Gal} L} = \frac{0,0132}{2\pi \left(18,2 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right) (0,4m)} = 0,000288 \text{ } ^\circ C/W$$

$$R_o = \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi k_{Gal} L} = \frac{0,269}{2\pi\left(0,041 \frac{W}{m^{\circ}C}\right)(0,4m)} = 2,611 \text{ }^{\circ}C/W$$

$$R_T = R_o + R_{Gal} + R_i = 2,612 \text{ }^{\circ}C/W$$

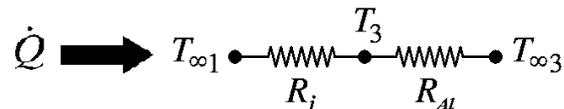
$$Q_o = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_T} = \frac{92^{\circ}C - 20^{\circ}C}{2,612 \text{ }^{\circ}C/W} = 27,565 \text{ W}$$

Flujo de calor a través del recipiente almacenador (\dot{Q}_g)

La cantidad de calor que se transfiere desde el agua a través del recipiente almacenador es energía que el fluido de estudio adquiere para elevar su temperatura. Conociendo que el espesor de material de recipiente es de 2mm se calcula el máximo flujo de calor en base al concepto de resistencia térmica.

Figura 34.

Esquema de resistencias térmicas para el recipiente almacenador



Donde:

R_i : resistencia térmica del agua

R_{Al} : resistencia térmica del aluminio

T_n : temperatura en los extremos de cada material

$$R_i = \frac{1}{h_{H2O} A_{H2O.2}} = \frac{1}{\left(6000 \frac{W}{m^2 \text{ }^{\circ}C}\right) (2\pi \times 0,122m \times 0,25m)} = 0,000869 \text{ }^{\circ}C/W$$

$$R_{Al1} = \frac{\ln\left(\frac{r_6}{r_5}\right)}{2\pi k_{Al} L} = \frac{0,0165}{2\pi\left(209 \frac{W}{m^{\circ}C}\right)(0,3m)} = 0,0000419 \text{ }^{\circ}C/W$$

$$R_{Al2} = \frac{x}{k_{Al} A_{Al}} = \frac{0,002}{\left(209 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right) (\pi \times 0,12^2 m)} = 0,000211 \text{ } ^\circ C/W$$

$$R_T = R_o + R_{Al1} + R_{Al2} = 0,00112 \text{ } ^\circ C/W$$

$$\dot{Q}_g = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 3}}{R_T} = \frac{92^\circ C - T_{\infty 3}}{0,00112^\circ C/W}$$

Para hallar el valor de la temperatura máxima en la pared interior del recipiente almacenador (\dot{Q}_g), se aplica la primera ley de la termodinámica suponiendo un sistema cerrado estacionario sin trabajo.

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_o + \dot{Q}_g$$

$$1013,36 \text{ W} = 27,565 \text{ W} + \frac{92^\circ C - T_{\infty 3}}{0,00112^\circ C/W}$$

$$T_{\infty 3} = \mathbf{90,89^\circ C}$$

$$\dot{Q}_g = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 3}}{R_T} = \frac{92^\circ C - 90,89^\circ C}{0,00112^\circ C/W} = \mathbf{991,071 \text{ W}}$$

La temperatura final del fluido que este dentro del recipiente almacenador dependerá de la densidad y el calor específico del mismo. Usando la siguiente expresión es posible encontrar aproximadamente la máxima temperatura del fluido de estudio. Si se despeja la variable de

$$T_{max} \cong \frac{991,071 + 262,8 \rho_{fluido} cp_{fluido}}{13,12 \rho_{fluido} cp_{fluido}}$$

Diseño sistema de refrigeración por compresión de vapor

El sistema de refrigeración es el encargado de extraer el exceso de calor del agua que adquirió para el proceso de baño maría, con el fin de estabilizar la temperatura del fluido de estudio. El diseño de este sistema es la parte relativamente más compleja que conforma el sistema de transferencia de calor a implementar en el prototipo de reómetro, para su diseño es necesario partir de datos conocidos y asumir ciertos valores y condiciones para representar el ciclo de refrigeración en un diagrama de Mollier que permite visualizar en cada punto del ciclo,

las condiciones del refrigerante seleccionado en cualquier estado termodinámico y obtener información para seleccionar los elementos que conforman el ciclo de refrigeración.

El diseño y los cálculos del sistema de refrigeración directa en el cual el fluido refrigerante recircula cíclicamente durante el proceso está fundamentado en base a la Nueva Enciclopedia de la Climatización con el subtema Refrigeración y para representar el ciclo del Diagrama de Mollier se utiliza el software computacional que mediante gráficos y tablas permite determinar los puntos de alta y baja presión, así como también el flujo de energía térmica en cada sección del ciclo de refrigeración.

Determinación de la carga calórica

La carga calórica se refiere a la cantidad de energía calorífica que el sistema de refrigeración debe absorber, por lo que se toma el valor de la cantidad de energía que se necesita para hervir el agua para efectos de cálculo.

$$\dot{Q}_i = 1013,36 \text{ W}$$

Selección del refrigerante

El refrigerante es un elemento primordial dentro de un sistema de refrigeración por compresión, razón por la cual es trascendental escoger el más adecuado al momento de diseñarlo, ya que las propiedades termodinámicas y fisicoquímicas que presente determinan el correcto funcionamiento del sistema y el hacer posible la extracción de calor del fluido de estudio.

Uno de los criterios de selección se centra en utilizar un refrigerante estable y seguro, que tenga bajos índices de inflamabilidad y toxicidad debido a que el prototipo de reómetro será generalmente manipulado por estudiantes dentro de un laboratorio por lo que se procura escoger un refrigerante de la agrupación A1.

Utilizar un refrigerante comercial es conveniente por la basta información existente de estudios que muestran cómo actúan en diferentes aplicaciones frigoríficas y la disponibilidad de conseguirlo, además que por lo general son más económicos que varios refrigerantes especiales.

Tomando en cuenta las consideraciones antes descritas, la utilidad de la aplicación y que el rango de temperatura en el cual se necesita mantener al fluido de estudio es positivo, se selecciona el refrigerante entre los candidatos más idóneos con apoyo de una tabla de selección en donde se evalúa cada parámetro sobre 3 puntos.

Tabla 13.

Matriz de comparación y selección del refrigerante

	R-410A	R-134A	R404A
Peso molecular	3	1	2
Temperatura crítica	1	3	2
Presión crítica	3	2	1
Impacto ambiental	1	3	2
Estabilidad con metales	2	3	2
Precio	2	3	1
Disponibilidad comercial	2	3	2
TOTAL	14	18	12

En la Tabla 13, se puede apreciar que el refrigerante HFC-134a tiene más puntaje por lo que será el refrigerante para utilizarse.

Características del refrigerante HFC-134a

Es un gas refrigerante perteneciente al grupo de los hidrofluorocarburos (HFC), sustancias formadas con átomos de hidrogeno, flúor y carbono. Este grupo de refrigerantes no generan daños a la atmosfera, cuentan con un alto grado de estabilidad térmica y química, baja toxicidad y no es inflamable ni corrosivo.

Las propiedades termodinámicas y fisicoquímicas del HFC-134a lo hacen ideal para varias aplicaciones de sistemas de refrigeración comercial y doméstica que operen con temperaturas de evaporación superiores a los 0°C.

Figura 35.

Propiedades físicas del refrigerante R134A

PROPIEDADES FÍSICAS		R 134A
Formula química		CH ₂ F-CF ₃
Nombre químico		1,1,1,2- Tetrafluoroetano
Peso molecular	(Kg/Kmol)	102
Punto de ebullición	(°C)	-26.2
Punto de congelación	(°C)	-101
Temperatura crítica	(°C)	101.1
Presión crítica	(bar)	40.67
Densidad crítica	(Kg/l)	0.51
Densidad del líquido (25°C)	(Kg/l)	1.206
Densidad del líquido (0°C)	(Kg/l)	1.293
Densidad del vapor (25°C)	(Kg/m ³)	32.25
Densidad del vapor (0°C)	(Kg/m ³)	14.41
Presión de vapor (25°C)	(bar)	6.657
Presión de vapor (0°C)	(bar)	216.4
Viscosidad del líquido (25°C)	(cP)	0.202
Presión superficial (25°C)	(mN/m)	7.9
Solubilidad del R134a en agua	(%)	0.15
Capacidad volumétrica refrig. (-25°C)	(Kg/m ³)	1192.11
Inflamabilidad		No

Nota. Tomado de (Ficha técnica refrigerante R134a)

Selección del sistema de refrigeración

En base a lo enunciado en el anterior capítulo, se selecciona un sistema de refrigeración directo con un solo ciclo, ya que el fluido a extraer el calor permanecerá en reposo y no todos los fluidos sirven como refrigerantes, además de ser más económica la implementación que la de un ciclo indirecto.

Cálculo del ciclo de refrigeración

Determinación temperatura de condensación

Para definir la temperatura de condensación es necesario conocer la temperatura ambiente ya que, en condensadores enfriador por aire a utilizarse en el ciclo de refrigeración,

debe existir una diferencia de 10°C a 15°C entre temperaturas para que se produzca la condensación. Para este caso se toma el valor de 15°C.

Según datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI), la temperatura ambiente en el país oscila entre 9°C y 31°C según la región, se toma el valor de 18°C para efectos de cálculo debido al área de influencia.

$$T_{cond} = T_{amb} + \Delta T$$

$$T_{cond} = 18^{\circ}C + 15^{\circ}C$$

$$T_{cond} = 33^{\circ}C$$

Determinación temperatura de evaporación

Para determinar la temperatura de evaporación se necesita conocer la humedad relativa y la temperatura mínima a la que deberá estar el fluido a extraer el calor. Dado que el tanque de almacenamiento de agua no es hermético se tomará como referencia la humedad relativa existente en el ambiente.

La siguiente tabla brinda información para estimar la temperatura de evaporación de sistemas frigoríficos que utilizan evaporadores de expansión húmeda con recirculador, es decir que están cargados de refrigerante que se mueve constantemente.

Tabla 14.

Humedad relativa para determinar la temperatura de evaporación

Humedad relativa	90%	85%	80%	75%
ΔT para tubos lisos	3°C	5°C	7°C	10°C
ΔT para tubos aletas	5-6°C	7-8°C	9-10°C	12-13°C

Donde:

ΔT : Diferencia de temperatura del tanque con fluido y temperatura de evaporación.

Según datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI), la humedad relativa en el país varía de 68% a 99% según la región, se toma el valor de 75% por

el área de influencia del proyecto de investigación. El evaporador para utilizar será de tubos lisos, por lo que:

$$\Delta T = T_{int} - T_{evap}$$

$$T_{evap} = T_{int} - \Delta T$$

$$T_{evap} = 20^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}$$

$$T_{evap} = 10^{\circ}\text{C}$$

Trazado del ciclo de refrigeración

Una vez determinadas las temperaturas de evaporación y condensación del ciclo, con ayuda de la tabla de presión – temperatura del refrigerante R-134a se establecen las presiones de trabajo.

Tabla 15.

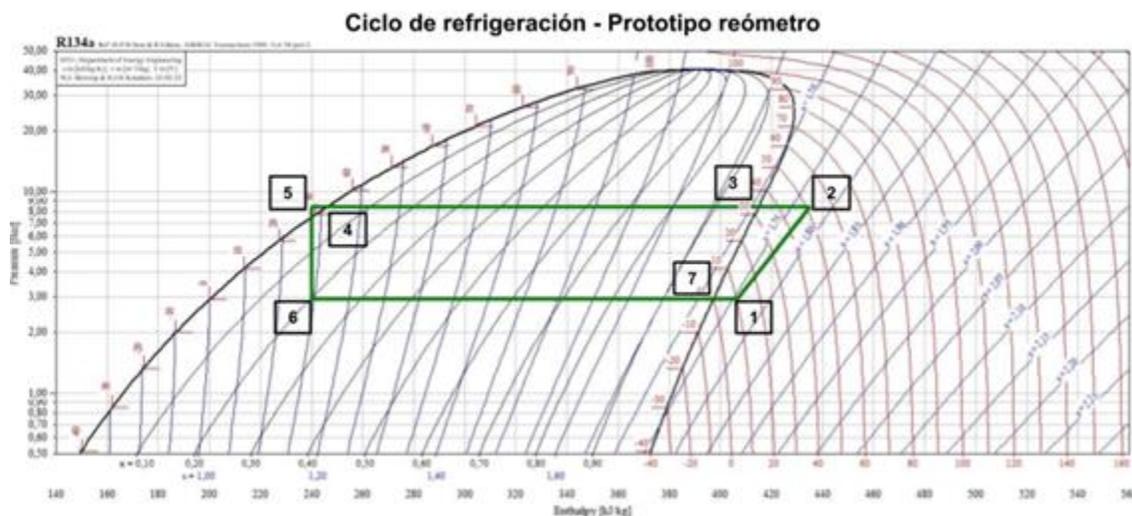
Condiciones de trabajo en evaporación y condensación

	Temperatura [°C]	Presión [bar]
Evaporación	0	4,14
Condensación	33	8,38

Para graficar el ciclo de refrigeración ideal se asume que la temperatura de subenfriamiento a la salida del condensador es de 5°C, la temperatura de recalentamiento a la salida del evaporador es de 10°C y se desprecia las pérdidas de presión y temperatura.

Figura 36.

Diagrama de Mollier para el ciclo de compresión de vapor



Nota. Diagrama creado para el refrigerante R134a

Los valores de temperatura, presión y entalpía de cada punto del diagrama de Mollier se enuncian en la siguiente tabla.

Tabla 16.

Valores de temperatura, presión y entalpía de cada punto del ciclo de refrigeración

Punto	Temperatura [°C]	Presión [bar]	Entalpía [KJ/Kg]
1	20	4,145	412,558
2	48,277	8,386	431,722
3	33	8,386	415,055
4	33	8,386	245,502
5	28	8,386	238,582
6	10	4,145	238,582
7	10	4,145	402,869

Cálculo de parámetros del ciclo de refrigeración

Una vez determinadas las entalpías para cada punto del ciclo de refrigeración se procede a calcular los parámetros del sistema de refrigeración que proporcionan información para la selección de los dispositivos.

Calor absorbido en el evaporador (q_e)

$$q_e = h_7 - h_6$$

Donde:

h_7 : entalpía a la salida del evaporador [kJ/kg]

h_6 : entalpia en la entrada del evaporador [kJ/kg]

Por lo tanto:

$$q_e = 402,869 - 238,582 = 164,287 \frac{kJ}{kg}$$

Caudal másico (\dot{m})

$$\dot{m} = \frac{Q}{q_e}$$

Donde:

Q : carga calórica a sustraer [kJ/h]

q_e : calor absorbido en el evaporador [kJ/kg]

Por lo tanto:

$$\dot{m} = \frac{2900}{164,287} = 17,652 \frac{kg}{h} = 0,00481 \frac{kg}{s}$$

Producción frigorífica volumétrica (q_v)

$$q_v = \frac{q_e}{v_{esp}}$$

Donde:

v_{esp} : volumen específico del refrigerante a la salida del evaporador [m³/kg]

q_e : calor absorbido en el evaporador [kJ/kg]

Por lo tanto:

$$q_v = \frac{164,287}{0,0492} = 3339,167 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

Caudal volumétrico teórico (\dot{v})

$$\dot{v} = \frac{Q_i}{q_v}$$

Donde:

Q_i : carga calórica a sustraer [kJ/h]

q_v : producción frigorífica volumétrica [kJ/m³]

Por lo tanto:

$$\dot{v} = \frac{2900}{3339,167} = 0,856 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,241 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Caudal volumétrico real (v_r)

Para calcular el caudal volumétrico real se necesita conocer la relación de compresión y el rendimiento volumétrico del compresor.

$$rc = \frac{p_{alta}}{p_{baja}}$$

$$n_v = 1 - 0,02 rc$$

Donde:

rc : relación de compresión

p_{alta} : presión a la salida del compresor [Bar]

p_{baja} : presión en la entrada del compresor [Bar]

n_v : rendimiento volumétrico del compresor

Por lo tanto:

$$rc = \frac{8,386}{4,145} = 2,023$$

$$n_v = 1 - 0,02 * 2,023 = 0,951$$

$$v_r = \frac{\dot{v}}{n_v} = \frac{0,241 \times 10^{-3}}{0,951} = 0,251 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}$$

Potencia del compresor (P_c)

$$P_c = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

Donde:

\dot{m} : caudal masico

h_2 : entalpia a la salida del compresor

h_1 : entalpía en la entrada del compresor

Por lo tanto:

$$P_c = 0,00481(431,722 - 412,558) = 0,0866 \frac{kJ}{s}$$

En vista que todas las maquinas no trabajan a plena capacidad, es recomendable aumentar por lo menos un 10% la potencia del compresor

$$P'_c = P_c * 1,10 = 0,0946 \frac{kJ}{s} = \frac{1}{10} HP$$

Calor liberado en el condensador (q_c)

$$q_c = h_2 - h_4$$

Donde

h_7 : entalpía a la salida del condensador [kJ/kg]

h_6 : entalpia en la entrada del condensador [kJ/kg]

Por lo tanto:

$$q_c = 431,722 - 245,502 = 186,221 \frac{kJ}{kg}$$

Selección de componentes

Selección del compresor

La selección del compresor se basa en los parámetros obtenidos del ciclo de refrigeración tales como el tipo de refrigerante, la potencia y caudal volumétrico. Con ayuda de catálogos de compresores comerciales y una tabla de selección se escoge el dispositivo más adecuado.

Tabla 17.

Matriz de comparación y selección del compresor

Requerimientos	EMBRACO EMI40HNR	SIKELAN QD30H11	DAEWOO LU66XZ1
Potencia	3	3	3
Refrigerante	3	3	3
Desplazamiento	2	3	2
Precio	1	3	2
Tamaño	3	2	1
Disponibilidad	1	2	1
TOTAL	13	16	12

Por lo tanto, el compresor Sikelan QD30H11 es idóneo para el trabajo según la Tabla 17.

Figura 37.

Compresor hermético Sikelan QD30H11

**Tabla 18.**

Especificaciones técnicas del compresor

ESPECIFICACIONES	DENOMINACIÓN
Marca	Sikelan
Modelo	QD30H11G
Tipo	Compresor hermético de pistón
Potencia	1/10 HP
Voltaje de operación	110V/60 Hz
Refrigerante	R134a
Capacidad	200L
Desplazamiento	3 cc

Selección del evaporador

El evaporador tiene como propósito esencial extraer calor del agua que se encuentra en el tanque contenedor, por lo que es importante escoger el indicado para la aplicación y tomar en cuenta el espacio disponible en la estructura del reómetro. De las consideraciones previas mencionadas para el cálculo de la temperatura de evaporación, la situación actual del prototipo reómetro y dado a la alta estabilidad del refrigerante HFC-134 con el cobre, se selecciona un evaporador enfriador de líquido de tipo serpentín de cobre utilizado generalmente para enfriar el

mosto de la cerveza. Las tuberías que conforman el evaporador son de tipo ACR, es decir que están diseñadas para sistemas de aire acondicionado y refrigeración. El diámetro de la tubería se escoge en base a lo que recomienda el fabricante del compresor, para este caso 3/8 de pulgada.

Figura 38.

Tubería flexible de cobre tipo ACR

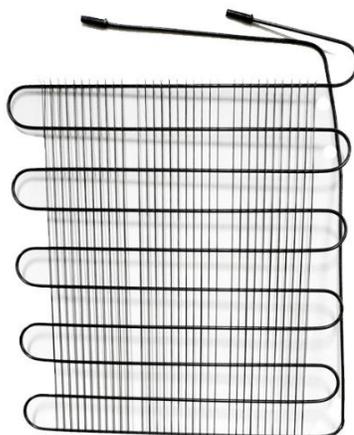


Selección del condensador

El reducido espacio en la estructura del reómetro limita las opciones de condensadores a escoger y dado que la cantidad de calor a emitirse del sistema de refrigeración puede ser procedida por un condensador de refrigerador doméstico, se selecciona un condensador de tubo de alambre.

Figura 39.

Condensador de tubo de alambre para refrigerador doméstico

**Tabla 19.**

Especificaciones técnicas del condensador

ESPECIFICACIONES	DENOMINACIÓN
Denominación	Condensador de tubo de alambre para refrigerador doméstico
Material de la tubería	Tubo de acero recubierto con cobre (Tubo Bundy)
Diámetro de la tubería	4,76 mm
Material del alambre	Acero al carbono
Espesor del alambre	1,20 mm
Tratamiento superficial	Negro electrodeposición

Selección del regulador de presión

Para seleccionar el dispositivo regulador de presión se considera las presiones de trabajo y que el fabricante del compresor recomienda utilizar filtros secadores si el sistema de

refrigeración está conformado con tuberías de cobre. El filtro secador escogido es compatible con el tipo de refrigerante que circula en el ciclo.

Figura 40.

Filtro secador de cobre



Tabla 20.

Especificaciones técnicas del filtro secador

ESPECIFICACIONES	DENOMINACIÓN
Denominación	Filtro secador
Material	Cobre
Conexión	Soldable de 1/4 de pulgada
Diámetro	5/8 de pulgada
Longitud	4 pulgadas
Peso tamiz molecular	10 gramos
Tipo de refrigerante	R134a

Selección de la niquelina

Previamente se calculó la carga térmica que el sistema de refrigeración debía ser capaz de absorber. A partir de dicho dato se calcula la potencia de la niquelina tomando en consideración que no todo el calor se transfiere al recipiente de aluminio, se multiplica por un

factor de seguridad al valor de cantidad de energía que debe generar la niquelina para elevar la temperatura del agua hasta los 92°C. Se seleccionará una niquelina con dicha potencia.

$$P_{niq} = Q * 1,20 = 1215,61 W$$

Figura 41.

Termo resistencia eléctrica de 1.2 kW



Tabla 21.

Especificaciones técnicas de la termo resistencia

ESPECIFICACIONES	DENOMINACIÓN
Tipo	Resistencia termo-eléctrica
Voltaje de operación	110 V
Consumo de corriente máximo	10,36 A
Potencia nominal	1200 W

Selección del controlador

En base a la decisión tomada al empezar el diseño del sistema de transferencia de calor de implementar un controlador Arduino se establece una tabla de selección para escoger el tipo de Arduino más adecuado para la aplicación.

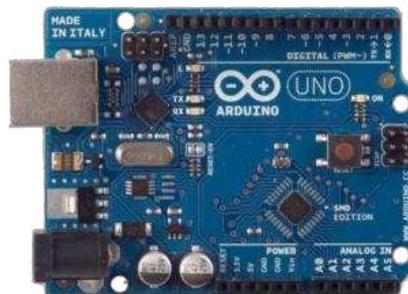
Tabla 22.*Selección del controlador*

Requerimientos	Arduino UNO	Arduino MEGA	Arduino NANO
Capacidad de procesamiento	2	3	1
Número de puertos digitales	3	3	1
Número de puertos analógicos	3	3	1
Versatilidad	3	2	2
Consumo de energía	2	1	3
TOTAL	13	12	8

El controlador para utilizar es un Arduino UNO, esta placa electrónica ofrece amplia compatibilidad con gran variedad de sensores en el mercado.

Figura 42.

Controlador Arduino UNO R3 ATmega328P

**Tabla 23.***Especificaciones técnicas del controlador*

ESPECIFICACIONES	DENOMINACIÓN
Denominación	Arduino UNO R3 ATmega328P
Voltaje de operación	5 VDC

ESPECIFICACIONES	DENOMINACIÓN
Velocidad de reloj	16 MHz
Tipo de conexión	1 puerto serial
Pines digitales	14 pines
Pines PWM	6 pines
Pines analógicos	6 pines

Selección de los sensores

Los sensores tipo termopar que se decidió implementar previamente, son compatibles con el controlador a través de su módulo transmisor y es robusto para soportar las condiciones de trabajo del reómetro durante los ensayos.

Figura 43.

Termocupla tipo K y su módulo transmisor MAX6675



Tabla 24.

Especificaciones técnicas del sensor de temperatura

ESPECIFICACIONES	DENOMINACIÓN
Tipo	Termocupla tipo K
Rango de temperatura	-200°C a 1300°C
Resolución de temperatura	0,25°C

ESPECIFICACIONES	DENOMINACIÓN
Precisión	1,5 °C
Voltaje de operación	5 V
Consumo de corriente	50 mA
Transmisor	MAX6675
Modo de salida	SPI

Posterior de realizar varios ensayos, se incorpora otro sensor de temperatura sumergible de tipo digital como es el DS18B20, permitiendo obtener mediciones más exactas utilizando menos componentes electrónicos por el protocolo de comunicación OneWire que maneja.

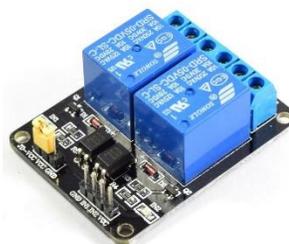
Figura 44.

Sensor de temperatura sumergible DS18B20



Selección de los pre actuadores

Los pre actuadores debe ser capaces de operar con el compresor y la niquelina, además de ser compatible con el controlador Arduino. Lo más adecuado y siguiendo con el modelo de diseño previo del prototipo del reómetro se escoge como pre actuadores a módulos relé con optoacoplador.

Figura 45.*Módulo relé con optoacoplador***Tabla 25.***Especificaciones del pre actuador*

ESPECIFICACIONES	DENOMINACIÓN
Denominación	Módulo relé con optoacopladores
Tipo de bobina	Sin enclavamiento
Voltaje de alimentación	5 VDC
Voltaje de conmutación	120-240 VAC
Corriente de conmutación	15-10 A
Temperatura de funcionamiento	-40°C a 105°C

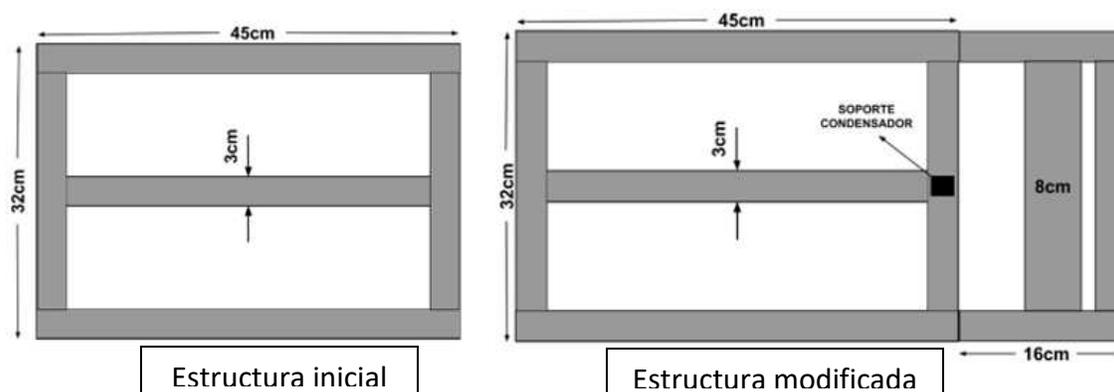
Capítulo 4: Construcción del sistema de transferencia de calor

Modificación de la estructura de soporte

Se suelda una extensión metálica en la base existente del tanque contenedor para colocar sobre ella el compresor y el condensador del ciclo de refrigeración.

Figura 46.

Esquema de la modificación de la estructura de soporte



Montaje de la resistencia eléctrica

Se realizaron orificios en la pared del tanque contenedor de agua para insertar las terminales de la termo resistencia eléctrica y fijarla. La niquelina se encuentra a 4 cm del fondo del recipiente para evitar atascos de partículas y facilitar su limpieza.

Figura 47.

Niquelina fijada dentro del tanque contenedor de agua



Cabe mencionar que la niquelina fue cambiada por una nueva del mismo tipo posterior a realizar varios ensayos, debido a que perdió sus características térmicas de funcionamiento.

Montaje del evaporador

Se suelda la tubería de cobre por donde circulará el refrigerante a baja temperatura alrededor del tanque contenedor con una separación de 5cm entre líneas de flujo. Se utiliza como material aislante lana mineral para concentrar la transferencia de calor entre el tanque contenedor de agua y el recipiente almacenador.

Figura 48.

Montaje de las tuberías del evaporador

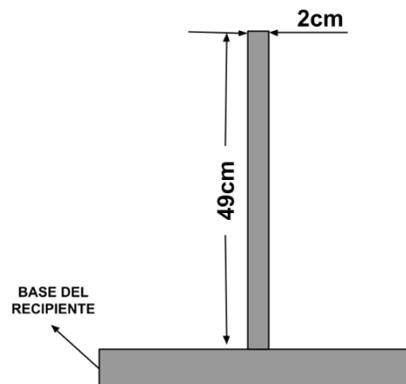


Montaje del condensador

Se soldó una varilla cuadrada en la base del tanque contenedor para sujetar el condensador del ciclo de refrigeración.

Figura 49.

Esquema estructura de apoyo del condensador



Se instalan dos condensadores en línea para asegurar la condensación del refrigerante. La implementación de un recipiente no es posible dado el espacio disponible en la estructura del reómetro.

Figura 50.

Condensador montado en la estructura



Montaje del compresor

Se fija el compresor en la extensión de la estructura base del tanque contenedor y se realizan las conexiones de las tuberías con distintos elementos del sistema de refrigeración para

formar un ciclo cerrado. Se utiliza suelda capilar para unir las tuberías y se cargó un total de 84g de refrigerante R134a.

Figura 51.

Compresor instalado con sus conexiones y cargado de refrigerante

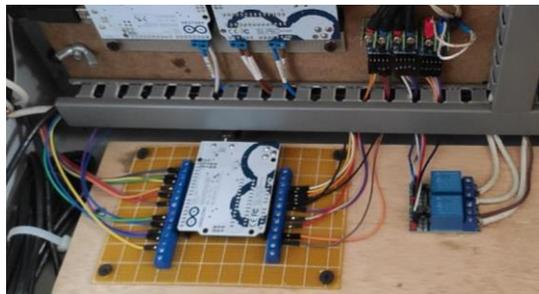


Montajes dispositivos electrónicos

Se incorporan los dispositivos electrónicos pertenecientes al sistema de transferencia de calor en el gabinete metálico existente del prototipo de reómetro, respetando la organización de los dispositivos de control y potencia.

Figura 52.

Montaje de dispositivos electrónicos



Construcción del recipiente almacenador del fluido de estudio

Se construye el recipiente almacenador en aluminio de modo que quepa centrado en el tanque contenedor de agua y sin existencia de filtraciones de agua u oxidaciones. Se uso suelda tipo TIG.

Figura 53.

Construcción recipiente almacenador del fluido de estudio

**Construcción soporte para sensores de temperatura**

Mediante guías en forma de L que se sujetan a la estructura del tanque contenedor, se introducen los sensores dentro del fluido de estudio. Están fabricadas en aluminio y tienen longitudes de 20 y 10 cm.

Figura 54.

Soporte para sensores de temperatura

**Recubrimiento del tanque contenedor de agua**

Se aplica un revestimiento con lámina de acero galvanizado al tanque contenedor para mayor robustez y resistencia del prototipo. Adicionalmente se instala una tubería conectada a una bomba para extraer el agua usada para el baño maría.

Figura 55.

Recubrimiento del tanque contenedor



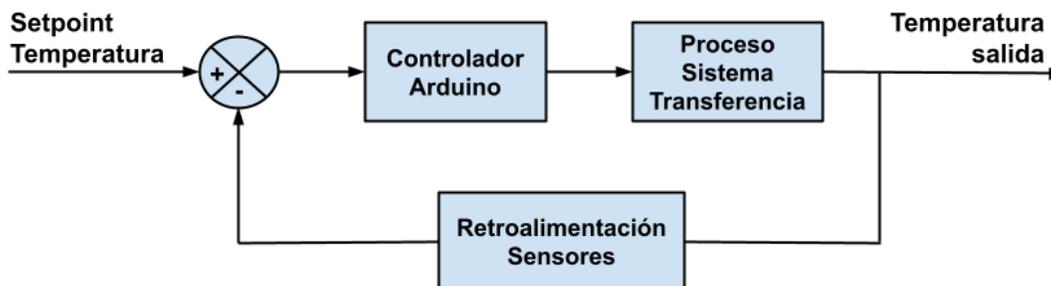
Programación y comunicación

Los sistemas controlados de temperatura por lo general presentan una lenta respuesta de evolución hasta llegar al valor de trabajo deseado, lo que posibilita implementar estrategia de control tipo ON/OFF como el aplicado al sistema de transferencia de calor, la programación desarrollada en Arduino gestiona la activación y desactivación de los componentes del sistema según las condiciones del fluido de estudio y la temperatura del agua.

La activación y desactivación del sistema de transferencia de calor se ejecuta desde la HMI programada en LabView que se intercomunica con el Arduino y recibe los datos de los sensores. En la HMI se selecciona la temperatura a la cual se desea trabajar y el microcontrolador realizara el accionamiento del compresor o la niquelina según sea conveniente.

Figura 56.

Esquema de sistema de control



Modificación interfaz HMI

La pantalla de configuración del sistema de transferencia de calor consta con un deslizador en la parte izquierda donde se indica la temperatura en la cual se ejecutará el ensayo reológico, cuenta con indicadores del valor de la temperatura de cada sensor y una gráfica de la evolución de la temperatura en función del tiempo.

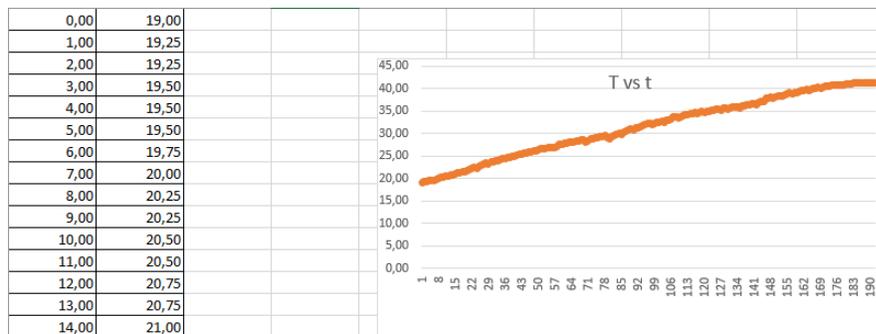
Figura 57.

Interfaz HMI incorporada al prototipo



La información del histórico de temperatura se almacena en un archivo Excel para posteriores análisis y realizar tratamiento de la información

Figura 58.

Almacenamiento de información

Capítulo 5: Pruebas y Resultados

Utilizando el prototipo de reómetro de hormigones se realizaron mediciones con tres diferentes fluidos no newtonianos, ingresando valores de torque para obtener datos de velocidad angular tal como permite la operación del prototipo, posteriormente dicha información es tratada y comparada con los resultados de los ensayos realizados en el reómetro DHR2 TA, el cual se halla en el Laboratorio de Reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

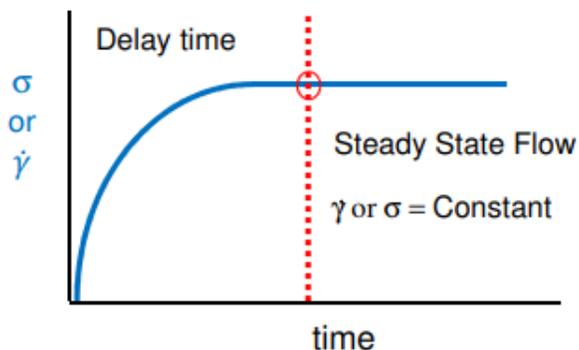
Condiciones del ensayo teórico

Los ensayos ejecutados en el reómetro DHR2 TA son usados para comparar las mediciones y calibrar la medición del prototipo, esta información es tomada como datos teóricos.

Se aplica un ensayo de tipo flujo escalonado o de estado estacionario, en el cual se obtiene el valor de viscosidad cuando se alcanza el estado estacionario en un barrido de velocidad de corte en cierto rango y a determinada temperatura.

Figura 59.

Ensayo de tipo estado estacionario



Nota. Tomado de (TA Instruments, 2019)

Pruebas con jabón líquido

Condiciones del ensayo experimental

Composición del jabón líquido

- 750 gramos de sal industrial
- 300 gramos de tensoactivos y antibacterial
- 100 gramos de ácido sulfónico
- 20 gramos de conservantes
- 2500 gramos de texapón

Temperaturas registradas del jabón líquido

Los ensayos se ejecutan a dos diferentes temperaturas de 20°C y 40°C como set point, con los siguientes resultados para cada prueba.

Tabla 26

Temperaturas registradas del jabón líquido

	Ensayo 1	Ensayo 2
Temperatura Setpoint (°C)	20	40
Temperatura ambiente (°C)	17	18
Temperatura medida (°C)	20 – 21,5	39,5 – 41
Temperatura real del fluido (°C)	20,7	40,2

Los valores de temperatura ambiente y temperatura real del fluido fueron obtenidos con ayuda de termómetros comerciales en los ensayos de todos los fluidos.

Caracterización reológica jabón líquido

Utilizando el prototipo reómetro de hormigones se ejecutaron mediciones con jabón líquido a 20°C obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 27*Datos medidos del jabón líquido*

Torque [Nm]	10,25	10	9,75	9,5	9,25	9	8,75	8,5
Velocidad [rpm]	70	69	66	64	63	60	58	55
	71	69	67	64	62	61	57	54
	70	70	66	65	63	61	58	53
	71	69	66	65	63	61	58	55
Velocidad promedio [rpm]	70,5	69,25	66,25	64,5	62,5	60,75	57,75	54,25

Se transforma los datos obtenidos de torque a esfuerzo de corte y la velocidad angular a velocidad de corte, esta información se toma como datos experimentales para posteriores cálculos.

Tabla 28*Datos experimentales velocidad de corte y esfuerzo de cizalla jabón líquido*

Velocidad de corte (1/s)	19,687	19,338	18,500	18,012	17,453	16,965	16,127	15,149
Esfuerzo de cizalla (Pa)	45,315	44,210	43,104	41,999	40,894	39,789	38,683	37,578

Los resultados obtenidos del reómetro del laboratorio para posteriores análisis son tomados como datos teóricos y se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 29*Datos teóricos velocidad de corte y esfuerzo de cizalla jabón líquido*

Velocidad de corte (1/s)	8	10	12	14	16	18	20	22
Esfuerzo (Pa)	25,866	30,578	34,731	38,412	41,680	44,628	47,283	49,674

Aplicando acciones de aproximación polinomial mediante el método de mínimos cuadrados se encuentra la ecuación cuadrática ajustada para los datos teóricos.

$$f_1(x) = -0,0364x^2 + 2,7792x + 6,3557$$

Mediante la ecuación cuadrática ajustada se calcula los valores de esfuerzo en el rango de medición de velocidad angular que permite el prototipo de reómetro de hormigón.

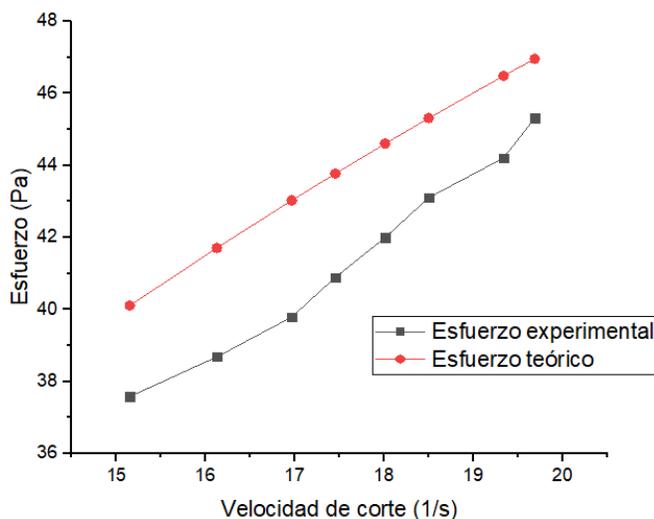
Tabla 30

Datos teóricos y experimentales jabón líquido a 20°C

Velocidad de corte [1/s]	19,687	19,338	18,500	18,012	17,453	16,965	16,127	15,149
Esfuerzo experimental [Pa]	45,315	44,210	43,104	41,999	40,894	39,789	38,683	37,578
Esfuerzo teórico [Pa]	46,962	46,488	45,314	44,605	43,774	43,028	41,709	40,105

Figura 60.

Curvas de flujo del jabón líquido a 20°C



La relación de los datos de velocidad de corte y esfuerzo evidenciada en las tablas, además de la curva de flujo vista en la Figura 59, muestran un comportamiento reofluidizante del

jabón líquido. El error absoluto de las mediciones es de 2,28% considerado bajo y no se buscará reducir el error.

La caracterización del comportamiento reológico para el jabón líquido se realiza usando la ecuación del modelo de ley de potencias de forma linealizada.

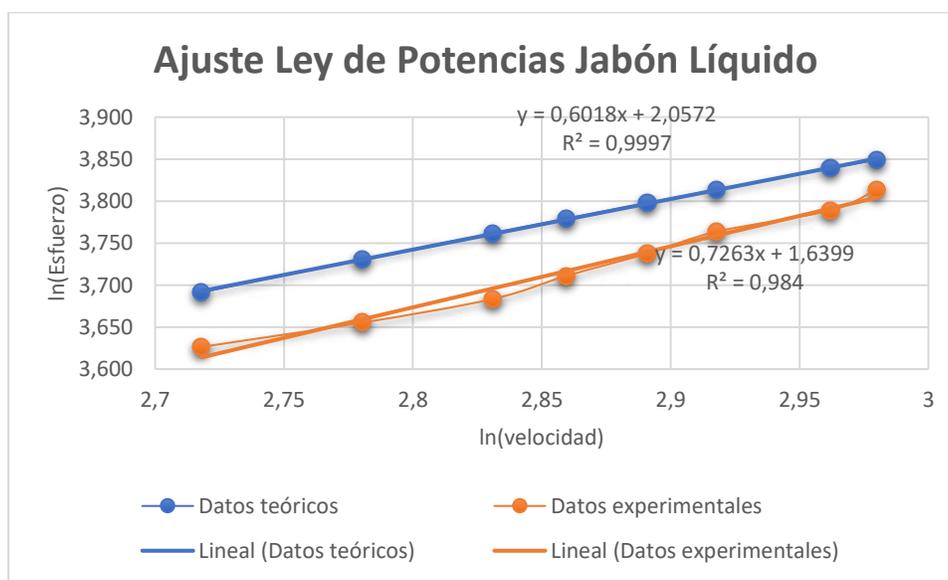
$$\tau = K\dot{\gamma}^n$$

$$\ln(\tau) = \ln(K) + n \ln(\dot{\gamma})$$

El modelo se aplica para los datos teóricos y experimentales del ensayo, en la siguiente figura se muestra el ajuste por ley de potencias para los reogramas del jabón líquido.

Figura 61.

Ajuste Ley de Potencias jabón líquido



Del ajuste del modelo de ley de potencias se obtienen los parámetros de las ecuaciones que describen el comportamiento reológico.

$$\tau_t = 7,824\dot{\gamma}^{0,602}$$

$$\tau_e = 5,15\dot{\gamma}^{0,726}$$

Se sigue el mismo procedimiento con el jabón líquido a de 40°C obteniendo los siguientes resultados para el diagrama de flujo y los parámetros del modelo reológico:

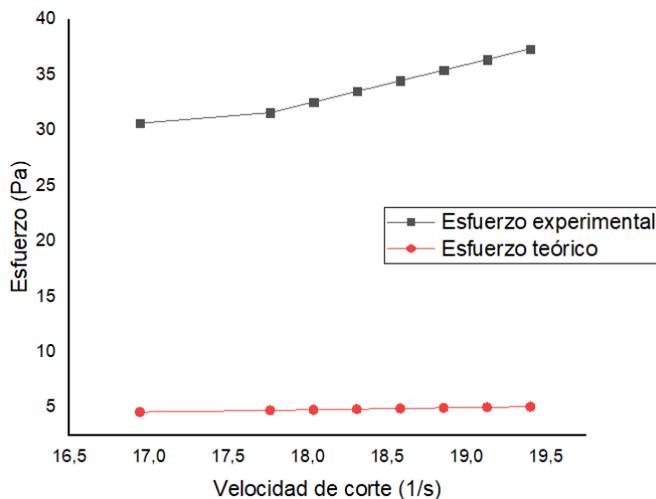
Tabla 31

Datos teóricos y experimentales jabón líquido a 40°C

Velocidad de corte [1/s]	19,403	19,130	18,856	18,583	18,310	18,037	17,763	16,943
Esfuerzo experimental [Pa]	37,364	36,406	35,448	34,490	33,532	32,574	31,616	30,658
Esfuerzo teórico [Pa]	5,073	5,021	4,968	4,914	4,860	4,806	4,752	4,586

Figura 62.

Curvas de flujo jabón líquido a 40°C



Reducción del error de medición

El error absoluto de las mediciones es de 32,24%. Para reducir el error entre las medidas se obtiene un factor de ajuste de la regresión lineal de la dispersión de puntos de los datos

obtenidos con el reómetro del laboratorio, dando como resultado la siguiente ecuación para este ensayo.

$$\text{Factor de corrección: } y = 0,198x + 1,232$$

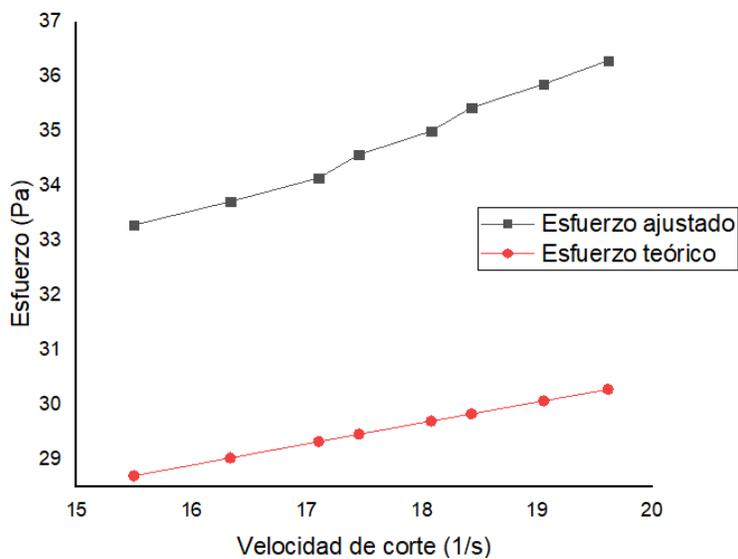
Tabla 32

Reducción del error de medición

Esfuerzo ajustado [Pa]	8,627	8,437	8,248	8,058	7,868	7,679	7,489	7,299
Esfuerzo teórico [Pa]	5,073	5,021	4,968	4,914	4,860	4,806	4,752	4,586

Figura 63.

Curva de flujo ajustada salsa de tomate a 20°C



Aplicando el factor de corrección el error absoluto se redujo a un 3,61%. Los parámetros reológicos según el modelo de ley de potencias para el jabón líquido de los ensayos experimentales a diferentes temperaturas se muestran en la Tabla 31.

Tabla 33*Parámetros reológicos jabón líquido*

	K	N	R²
20°C	5,15	0,726	0,984
40°C	0,451	0,816	0,983

Mediante la variación de las constantes reológicas ante diferentes temperaturas se evidencia que la temperatura es un factor influyente en la viscosidad de fluidos no newtonianos.

Salsa de tomate**Condiciones ensayo experimental salsa de tomate****Especificaciones del producto**

Marca: Rey Sabor – Grupo Terán

Peso neto: 3.5 kg

Lote: 85

Temperaturas registradas de la salsa de tomate

Los ensayos se ejecutan a dos diferentes temperaturas de 20°C y 40°C como set point, con los siguientes resultados para cada prueba.

Tabla 34*Temperaturas registradas de la salsa de tomate*

	Ensayo 1	Ensayo 2
Temperatura Setpoint (°C)	20	40
Temperatura ambiente (°C)	18,5	18
Temperatura medida (°C)	19,5 – 20,75	40 – 41
Temperatura real del fluido (°C)	20,4	40

Caracterización reológica salsa de tomate

Utilizando el prototipo reómetro de hormigones se ejecutaron mediciones con salsa de tomate a 20°C obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 35

Datos medidos de la salsa de tomate

Torque [Nm]	10,5	10,25	10	9,75	9,5	9,25	9	8,75
Velocidad [rpm]	69	68	66	65	63	60	58	55
	71	69	66	64	62	61	59	56
	70	68	67	65	63	62	59	55
	71	68	65	65	62	62	58	56
Velocidad promedio [rpm]	70,25	68,25	66	64,75	62,5	61,25	58,5	55,5

Se transforma los datos obtenidos de torque a esfuerzo de corte y la velocidad angular a velocidad de corte, esta información se toma como datos experimentales para posteriores cálculos.

Tabla 36

Datos experimentales velocidad de corte y esfuerzo de cizalla salsa de tomate

Velocidad de corte [1/s]	19,618	19,059	18,431	18,082	17,453	17,104	16,336	15,499
Esfuerzo [Pa]	45,315	44,210	43,104	41,999	40,894	39,789	38,683	37,578

Los resultados obtenidos del reómetro del laboratorio para posteriores análisis son tomados como datos teóricos y se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 37*Datos teóricos velocidad de corte y esfuerzo de cizalla salsa de tomate*

Velocidad de corte (1/s)	10	12	14	16	18	20	22	24
Esfuerzo (Pa)	26,640	27,133	27,985	28,845	29,682	30,472	31,216	31,929

Aplicando acciones de aproximación polinomial mediante el método de mínimos cuadrados se encuentra la ecuación cuadrática ajustada para los datos teóricos.

$$f_2(x) = -0,0026x^2 + 0,4757x + 21,948$$

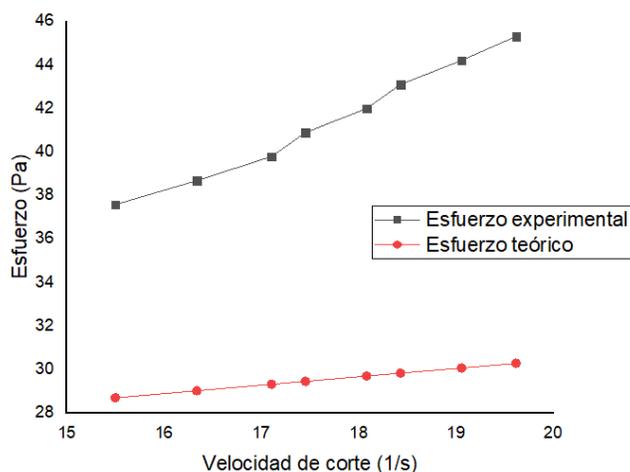
Mediante la ecuación cuadrática ajustada se calcula los valores de esfuerzo en el rango de medición de velocidad angular que permite el prototipo de reómetro de hormigón.

Tabla 38*Datos teóricos y experimentales salsa de tomate a 20°C*

Velocidad de corte [1/s]	19,618	19,059	18,431	18,082	17,453	17,104	16,336	15,499
Esfuerzo experimental [Pa]	45,315	44,210	43,104	41,999	40,894	39,789	38,683	37,578
Esfuerzo teórico [Pa]	30,279	30,070	29,832	29,699	29,459	29,324	29,025	28,696

Figura 64.

Curvas de flujo salsa de tomate a 20°C



La relación de los datos de velocidad de corte y esfuerzo evidenciada en las tablas, además de la curva de flujo vista en la Figura 63, muestran un comportamiento refluidizante de la salsa de tomate.

Reducción del error de medición

El error absoluto de las mediciones es de 11,89%. Para reducir el error entre las medidas se aplica el mismo método usado para el primer fluido obteniendo la siguiente expresión:

$$\text{Factor de corrección: } y = 0,389x + 18,663$$

Tabla 39

Reducción del error de medición salsa de tomate a 20°C

Esfuerzo ajustado [Pa]	36,300	35,869	35,439	35,009	34,579	34,149	33,719	33,288
Esfuerzo teórico [Pa]	30,279	30,070	29,832	29,699	29,459	29,324	29,025	28,696

Aplicando el factor de corrección el error absoluto se redujo a un 3,61%.

La caracterización del comportamiento reológico para la salsa de tomate a 20°C se realiza usando la ecuación del modelo de ley de potencias de forma linealizada.

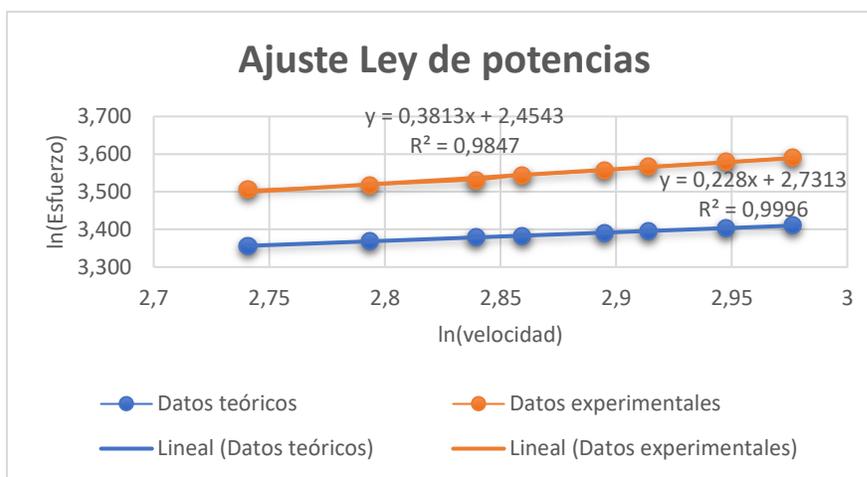
$$\tau = K\dot{\gamma}^n$$

$$\ln(\tau) = \ln(K) + n \ln(\dot{\gamma})$$

El modelo se aplica para los datos teóricos y experimentales del ensayo, en la siguiente figura se muestra el ajuste por ley de potencias para los reogramas de la salsa de tomate.

Figura 65.

Ajuste por Ley de Potencias salsa de tomate a 20°C



Del ajuste del modelo de ley de potencias se obtienen los parámetros de las ecuaciones que describen el comportamiento reológico.

$$\tau_t = 15,35\dot{\gamma}^{0,228}$$

$$\tau_e = 11,63\dot{\gamma}^{0,3813}$$

Se sigue el mismo procedimiento con la salsa de tomate a de 40°C obteniendo los siguientes resultados para el diagrama de flujo y los parámetros del modelo reológico:

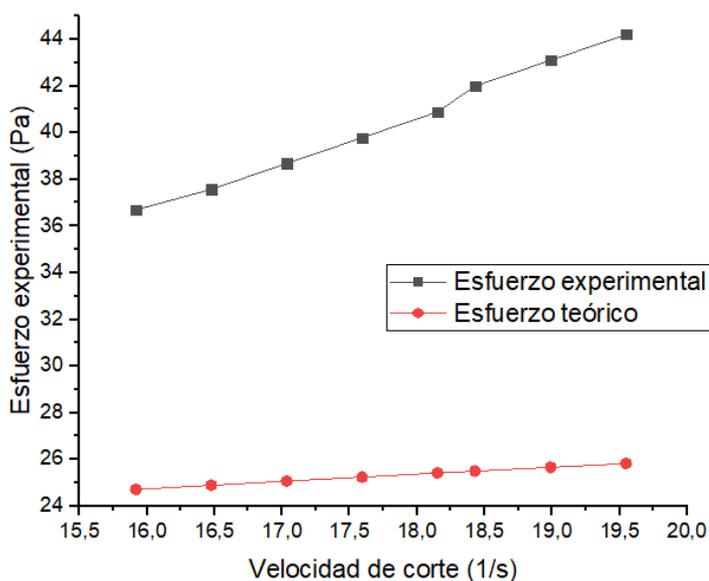
Tabla 40

Datos teóricos y experimentales salsa de tomate a 40°C

Velocidad de corte [1/s]	19,548	18,989	18,431	18,151	17,593	17,034	16,476	15,917
Esfuerzo experimental [Pa]	44,210	43,104	41,999	40,894	39,789	38,683	37,578	36,694
Esfuerzo teórico [Pa]	25,823	25,664	25,501	25,418	25,248	25,074	24,896	24,714

Figura 66.

Curvas de flujo salsa de tomate a 40°C



Reducción del error de medición

El error absoluto de las mediciones es de 15,08%. Para reducir el error entre las medidas se aplica el mismo método usado anteriormente consiguiendo una reducir el error a 7,025% con el siguiente factor de corrección:

$$\text{Factor de corrección: } y = 0,310x + 19,663$$

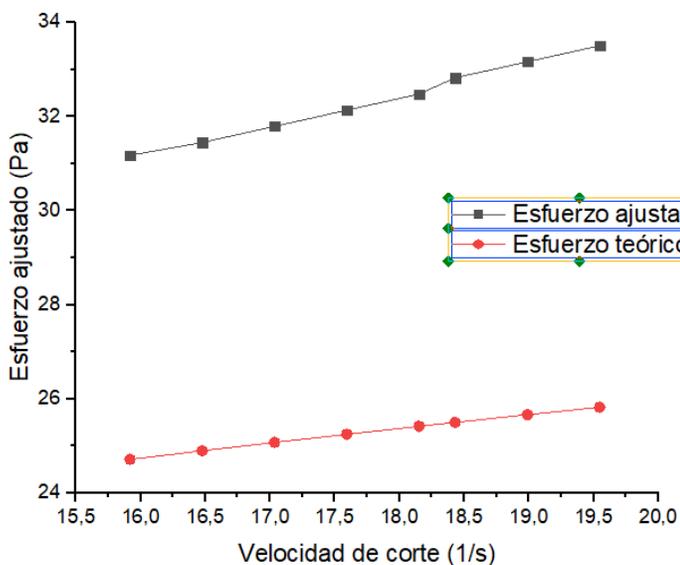
Tabla 41

Reducción del error de medición salsa de tomate a 40°C

Esfuerzo ajustado [Pa]	33,511	33,168	32,824	32,481	32,137	31,794	31,450	31,176
Esfuerzo teórico [Pa]	25,823	25,664	25,501	25,418	25,248	25,074	24,896	24,714

Figura 67.

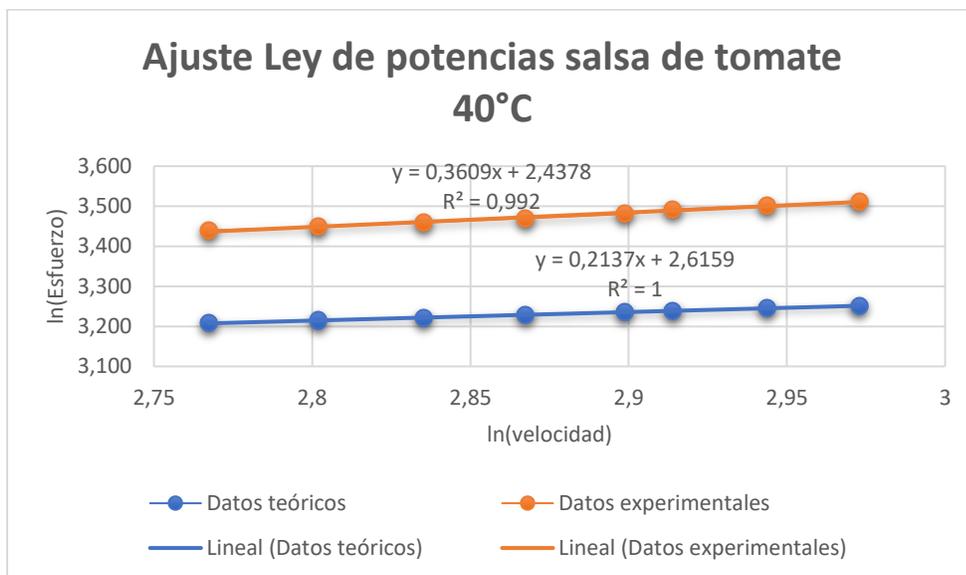
Curvas de flujo de la salsa de tomate a 40°C con la corrección



La caracterización del comportamiento reológico para la salsa de tomate a 40°C se realiza usando la ecuación del modelo de ley de potencias de forma linealizada.

Figura 68.

Ajuste por Ley de Potencias salsa de tomate a 40°C



Los parámetros reológicos según el modelo de ley de potencias para el jabón líquido de los ensayos experimentales a diferentes temperaturas se muestran en la Tabla 39.

Tabla 42

Parámetros reológicos salsa de tomate

	K	N	R²
20°C	11,63	0,381	0,984
40°C	11,44	0,360	0,992

Mediante la variación de las constantes reológicas ante diferentes temperaturas se evidencia que la temperatura es un factor influyente en la viscosidad de fluidos no newtonianos.

Melaza de Caña

Condiciones del ensayo experimental melaza de caña

Especificaciones de la melaza de caña

La melaza de caña es un líquido espeso de origen vegetal con tonalidad marrón oscuro, obtenido de la concentración de los caldos de producción de azúcar de caña aptos para consumo humano. Sus atributos como fertilizante resultan sumamente atractivos.

Temperaturas registradas de la melaza de caña

Los ensayos se ejecutan a dos diferentes temperaturas de 20°C y 40°C como set point, con los siguientes resultados para cada prueba.

Tabla 43

Temperaturas registradas de la melaza de caña

	Ensayo 1	Ensayo 2
Temperatura Setpoint (°C)	20	40
Temperatura ambiente (°C)	18	18
Temperatura medida (°C)	20 – 21	39 – 40,5
Temperatura real del fluido (°C)	20	39,8

Caracterización reológica de la melaza

Se aplica el mismo procedimiento seguido con el jabón líquido y la salsa de tomate, utilizando el prototipo reómetro de hormigones para ejecutar mediciones con melaza de caña a 20°C obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 44

Datos medidos de la melaza a 20°C

Torque [Nm]	14,5	14	13	12	11,5	11	10,5	10,25
Velocidad [rpm]	73	71	66	64	63	60	58	55
	71	70	67	65	63	62	59	56
	72	71	67	66	64	62	59	54

	72	70	65	65	63	61	59	56
Velocidad promedio [rpm]	72	70,5	66,25	65	63,25	61,25	58,75	55

Se transforman los datos obtenidos de torque a esfuerzo de corte y la velocidad angular a velocidad de corte, esta información se toma como datos experimentales y la conseguida del reómetro del laboratorio se toma como datos teóricos.

Tabla 45.

Datos experimentales de velocidad de corte y esfuerzo para la melaza a 20°C

Velocidad de corte (1/s)	20,106	19,687	18,500	18,151	17,663	17,104	16,406	15,359
Esfuerzo (Pa)	64,104	61,894	57,473	53,052	50,841	48,631	46,420	44,210

Tabla 46.

Datos teóricos de velocidad de corte y esfuerzo para la melaza a 20°C

Velocidad de corte (1/s)	12	14	16	18	20	22	24	26
Esfuerzo (Pa)	137,756	156,554	174,857	192,628	210,133	227,267	244,162	260,798

Aplicando acciones de aproximación polinomial mediante el método de mínimos cuadrados se encuentra la ecuación cuadrática ajustada para los datos teóricos.

$$f_3(x) = 0,393x^2 + 15,545x + 1,197$$

Mediante la ecuación cuadrática ajustada se calcula los valores de esfuerzo en el rango de medición de velocidad angular que permite el prototipo de reómetro de hormigón.

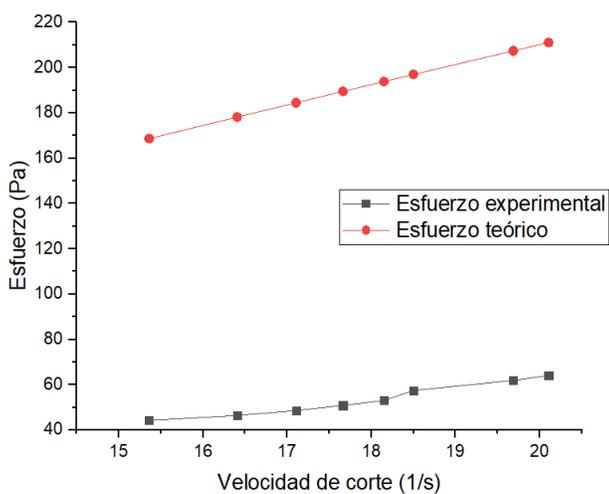
Tabla 47.

Datos teóricos y experimentales de la melaza a 20°C

Velocidad de corte (1/s)	20,106	19,687	18,500	18,151	17,663	17,104	16,406	15,359
Esfuerzo experimental (Pa)	64,104	61,894	57,473	53,052	50,841	48,631	46,420	44,210
Esfuerzo teórico (Pa)	211,104	207,437	196,967	193,856	189,505	184,497	178,200	168,676

Figura 69.

Curvas de flujo melaza a 40°C



La relación de los datos de velocidad de corte y esfuerzo evidenciada en las tablas, además de la curva de flujo vista en la Figura 67, muestran un comportamiento refluidizante de la melaza de caña.

Siguiendo el procedimiento desarrollado en secciones anteriores para otros fluidos se presenta en la Tabla 44 los datos obtenidos del ensayo con la melaza a 40°C.

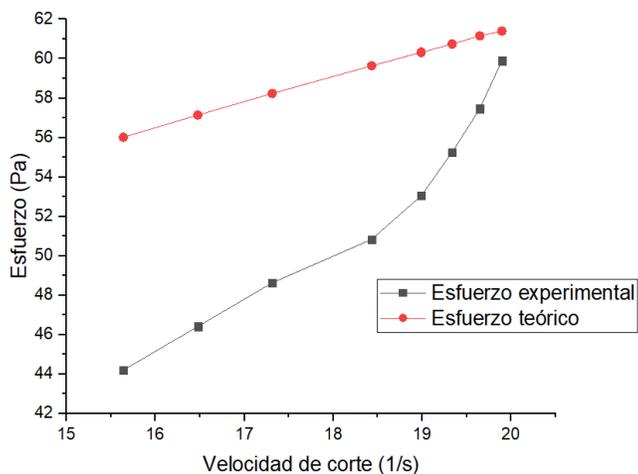
Tabla 48.

Datos teóricos y experimentales de la melaza a 40°C

Velocidad de corte (1/s)	19,897	19,648	19,338	18,989	18,431	17,314	16,476	15,638
Esfuerzo experimental (Pa)	59,894	57,473	55,262	53,052	50,841	48,631	46,420	44,210
Esfuerzo teórico (Pa)	61,405	61,160	60,748	60,330	59,648	58,241	57,146	56,018

Figura 70.

Curvas de flujo melaza de caña a 40°C



Reducción del error de medición

Para reducir el error entre las medidas se aplica de igual manera, obteniendo un factor de ajuste de la regresión lineal de la dispersión de puntos de los datos obtenidos con el reómetro del laboratorio. El error absoluto de las mediciones a temperatura referencial de 20°C se redujo de 137,24% a un 50,49% y para temperatura de 40°C de 12,37% al 10,159%.

$$\text{Factor de corrección (20°): } y = 3,944x + 31,442$$

$$\text{Factor de corrección (40°): } y = 1,028x + 0,360$$

Los parámetros reológicos según el modelo de ley de potencias para el jabón líquido de los ensayos experimentales a diferentes temperaturas se muestran en la Tabla 39.

Tabla 49

Parámetros reológicos melaza de caña

	K	N	R²
20°C	17,29	0,833	0,994
40°C	19,49	0,381	0,992

Mediante la variación de las constantes reológicas ante diferentes temperaturas se evidencia que la temperatura es un factor influyente en la viscosidad de fluidos no newtonianos.

Capítulo 6: Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

Conclusiones

Los resultados evidenciados en los ensayos permiten concluir que los fluidos utilizados en las pruebas presentan un comportamiento de adelgazamiento por cizalla, ya que se observa que el esfuerzo cortante aumenta a medida que la velocidad de corte crece.

A través del modelamiento reológico por ley de potencias con los parámetros resultantes, se verifica cuantitativamente que la temperatura incide considerablemente en el comportamiento de flujo de fluidos no newtonianos, haciendo importante la integración del control de temperatura en un reómetro.

La presencia de altos errores de medición en ciertos ensayos con los fluidos de estudio usados se debe a su bajo índice de viscosidad en comparación a otros fluidos como el hormigón, ya que el diseño originario del prototipo es únicamente para fluidos que necesiten altos valores de esfuerzo de corte, como los hormigones autocompactantes, por la geometría de vanos implementada y la construcción misma del prototipo.

En la construcción del recipiente almacenador del fluido de estudio se incorporan unos soportes en la base para aguantar el peso del recipiente y lo que contenga, además de unas guías para centrar el recipiente con el eje de la geometría de vano.

La temperatura más alta que podrá alcanzar el fluido a analizar dependerá de su densidad y el calor específico que lo caracteriza.

Se diseñó algunas posibilidades para la ubicación de los sensores dentro del recipiente de almacenamiento sin que interfieran en la medición, se escogió la disposición más eficiente y fácil de implementar a la estructura del sistema de transmisión de calor.

Se seleccionó un compresor con potencia de 1/10 HP y una niquelina de 1200W las mismas que mediante dimensionamiento cumplen con los requisitos suficientes para garantizar

el funcionamiento adecuado del sistema de transferencia de calor y variar la temperatura del fluido de estudio.

Los cambios de viscosidad o temperatura por efectos de la presión son casi insignificantes por lo que no fue necesario implementar un mecanismo que controle esta variable.

Se selecciona como fluido de calentamiento para el baño maría al agua por su alta capacidad para almacenar energía útil para elevar la temperatura del fluido de estudio.

Se selecciona como material constitutivo del recipiente almacenador del fluido de estudio el aluminio por su elevado valor de conductividad térmica y la alta resistencia a la oxidación exhibida, siendo ideal para la aplicación.

Instalar otro recipiente más pequeño para almacenar el fluido de estudio ayudo a evitar la sedimentación del fluido durante el ensayo, ya que inicialmente tenía un tamaño excesivo.

El sistema de transferencia de calor implementado al prototipo está programado para tomar la temperatura de trabajo a través del interfaz humano máquina que mediante gráficas, muestra la evolución de la temperatura en el tiempo hasta llegar al valor de temperatura seteado.

Los cálculos de balance energético mostraron que el recipiente de aluminio presenta poca resistencia a la transferencia de calor debido a sus propiedades, lo que favorece el elevar la temperatura del fluido de estudio.

La implementación del sistema de transferencia de calor en el prototipo de reómetro se realizó por separado, tanto para control y potencia con el fin de poder realizar modificaciones y mantenimiento del equipo fácilmente.

Se modificó y mejoró las conexiones de la parte de potencia y el hardware en la parte de control de la situación inicial del reómetro con el fin de evitar interferencias electromagnéticas por la presencia de las cargas inductivas y la variación de voltaje presente en el laboratorio.

El diseño del sistema de compresión de vapor para la refrigeración fue acertado ya que los 82g de refrigerante que circulan en su interior tiene la capacidad suficiente para sustraer el calor del agua y disminuir la temperatura de la muestra.

El recubrimiento de lana mineral al sistema de transferencia de calor ayuda a reducir las pérdidas de calor hacia el ambiente, así como también el calor que se pierde por radiación en la superficie del fluido de estudio no se considera por ser relativamente bajo.

Las modificaciones realizadas al prototipo de reómetro de hormigones fueron ejecutadas respetando las consideraciones de diseño inicial, así como las relaciones geométricas entre la geometría de paleta y el recipiente contenedor, sin alterar su funcionamiento.

Recomendaciones

Limpiar correctamente el prototipo después de realizar los ensayos para preservar los elementos, alargar la vida útil de los mismos y evitar acumulación de partículas indeseables.

Procurar conectar el prototipo a una fuente de energía estable con conexión a tierra para evitar fluctuaciones en las medidas de los sensores debido a la presencia de varias cargas inductivas.

Utilizar un ordenador con alta capacidad de procesamiento para obtener la información con más rapidez y optimizar el funcionamiento del prototipo.

Añadir la muestra de ensayo al recipiente almacenador separado de la estructura del reómetro para evitar derrames sobre la parte eléctrica y daños indeseados.

En el caso de presentar algún problema en las mediciones de los sensores de temperatura, reiniciar el equipo y el programa de la interfaz HMI.

Trabajos futuros

Como trabajo futuro se prevé implementar un interfaz humano máquina específica para el prototipo de reómetro y a su vez cambiar los dispositivos de control por un PLC para gestionar los actuadores y el funcionamiento del equipo.

Referencias

- Arnabat, I. (28 de Diciembre de 2007). *Sistema de refrigeracion aire acondicionado: compresión y absorción*. Obtenido de Calor y Frío: <https://www.caloryfrio.com/aire-acondicionado/aire-instalaciones-componentes/sistemas-de-refrigeracion-compresion-absorcion.html>
- Barnes, H. A., Hutton, J. E., & Walters, R. (1989). *An introduction to rheology*. Amsterdam: Elsevier.
- Bourne, M. (2002). *Food texture and viscosity: concept and measurement* (Segunda ed.). New York: Elsevier.
- Camaraza, Y. (2020). *Introducción a la termotransferencia* (Primera ed.). Cuba: Editorial Universitaria de Matanzas. Obtenido de https://books.google.com.ec/books/about/Introducci%C3%B3n_a_la_termotransferencia.html?id=RsRLswEACAAJ&redir_esc=y
- Cárdenas, C., Sánchez, J., Ariza, E., & Machuca, W. (2013). Análisis reológico para predecir y mejorar el comportamiento hidráulico durante la perforación de un pozo. *Revista Fuentes, El reventón energético*, 11(1). Obtenido de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/3613>
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2004). *Mecánica de Fluidos, Fundamentos y Aplicaciones* (Primera ed.). Mexico: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2011). *Transferencia de calor y masa* (Cuarta ed.). Mexico DF: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- Chiguer, S. (2019). *Importancia de las características físico-químicas de las lágrimas artificiales para la superficie ocular*. Trabajo fin de grado, Universidad Zaragoza, Facultad de Ciencias, Zaragoza.
- Coleman, B., Markowitz, H., & Noll, W. (1966). *Viscometric flows of non-Newtonian fluids*. Berlín: Springer-Verlag.

- Coussot, P. (2005). *Rheometry of Pastes, Suspensions and Granular Materials. Applications in Industry and Environment*. New York: John Wiley & Sons.
- de Casajuana, B. F. (2005). *Diferentes modos de transferencia de calor*. España. Obtenido de <https://consultar-imprimir.es/transferencias/transferencia-de-calor-por-conduccion/>
- Díaz, R. (2018). *Reología aplicada a sistemas alimentarios* (Primera ed.). Guayaquil, Ecuador: Editorial Grupo Compás. Obtenido de <http://142.93.18.15:8080/jspui/bitstream/123456789/270/1/CORRECCIONES-ilovepdf-compressed.pdf>
- Domingo, A. (2011). *Apuntes de Mecánica de Fluidos*. Universidad Politecnica de Madrid. Madrid: Creatice Commons. Obtenido de <https://oa.upm.es/6531/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>
- Franco, J. M. (2006). *Manual de refrigeración* (Primera ed.). Barcelona: Editorial Reverté.
- Groves, M., & Ahmad, A. (1976). Some rheological properties of lyotropic liquid crystals formed by phosphated polyoxyethylene surfactants, n-hexane and water. *Rheologica Acta*, 15(9), 501-507. doi:<https://doi.org/10.1007/BF01530352>
- Guayasamín, M., & Molina, J. (2022). *Construcción de un baño maria para pruebas de tratamientos termicos a nivel de laboratorio*. Universidad Nacional de Chimborazo, Facultad de ingeniería Agroindustrial, Riobamba. Obtenido de <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/8678/1/TESIS%20FINAL%20Srta.Maria%20Guayasamin%20y%20Joselin%20Molina%20firmado-signed.pdf>
- Holman, J. P. (1999). *Transferencia de calor* (Décima ed.). México DF: Compañía Editorial Continental S.A.
- Incropera, F., & DeWitt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* (Cuarta ed.). México: PEARSON. Obtenido de https://books.google.com.ec/books?id=QqfJw4tpljcC&printsec=frontcover&dq=transferencia+de+calor&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=transferencia%20de%20calor&f=false

- INDUBEL. (2019). *Refrigerantes*. Obtenido de Gases refrigerantes: <http://www.indubel.com.ar/pdf/gases/refrigerantes.pdf>
- Kreith, F., Manglik, R., & Bohn, M. (2012). *Principios de la transferencia de calor* (Septima ed.). Mexico DF: CENGAGE Learning.
- Macosko, C. (1994). *RHEOLOGY: Principles, measurements and applications* (Primera ed.). New York: VCH Publishers Inc.
- Malkin, A. (1994). *Rheology fundamentals (Fundamental topics in rheology)* (Primera ed.). Ontario: ChemTec Publishing.
- Medina, E. (2016). *Cinemática de flujo de un hidrogel en un reometro de couette*. Instituto Politécnico Nacional, Escuela de Ingeniería química e industrias extractivas, México. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/23336/Tesis%20Cinem%C3%A1tica%20de%20flujo%20de%20un%20hidrogel%20en%20un%20re%C3%B3metro%20de%20Couette.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Méndez, A., Pérez, L., & Paniagua, M. (Enero de 2010). Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette). *Latin-American Journal of Physics Education*, 4(1), 237-245.
- Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos* (Sexta ed.). Mexico: PEARSON EDUCATION.
- Pascual, E. (2016). *Estudio del comportamiento reológico de un fluido reoespesante*. Trabajo fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de ingeniería mecánica, Madrid. Obtenido de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/28482/PFC_Esther_Pascual_Gutierrez.pdf?sequence=1
- Pita, E. (1991). *Principios y sistemas de refrigeración* (Primera ed.). New York: Editorial LIMUSA.
- Ramírez, J. A. (2007). *Nueva Enciclopedia de la climatización: Refrigeración* (Primera ed.). Barcelona: Grupo CEAC. Obtenido de

<https://books.google.com.ec/books?id=Vx8qf3wrd1sC&pg=PA378&dq=refrigeracion&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiB4t6Z3Of3AhVYRjABHY4UCOMQ6wF6BAglEAE#v=onepage&q=refrigeracion&f=false>

- Renedo, C. (2011). *Tecnología frigorífica, Refrigerantes y Salmueras*. Universidad de Cantabria, Ingeniería Eléctrica y Energética, Cantabria. Obtenido de <https://personales.unican.es/renedoc/traspereancias%20web/trasp%20tec%20frig/005%20refrig%20y%20salm.pdf>
- Rizzo, F., Pinto, F., & Meo, M. (2020). Investigation of Silica-Based Shear Thickening Fluid in Enhancing Composite Impact Resistance. *Applied Composite Materials*, 209-229. doi:<https://doi.org/10.1007/s10443-020-09805-7>
- Rojas, O., Briceño, M., & Avendaño, J. (2012). *Fundamentos de Reología*. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería Química. Mérida: FIRP. Obtenido de <https://es.firp-ula.org/wp-content/uploads/2019/07/S521C.pdf>
- Romero, E. (2007). *Metodos Numericos - Ajuste de curvas*. UNISANGIL, Yopal. Obtenido de http://www.geocities.ws/datos_universidad/MNumericos/AjusteDeCurvas.pdf
- Rubio, F. (2022). *Flujos no-Newtonianos y Reología* (Primera ed.). Málaga, España: umaeditorial. Obtenido de https://www.umaeditorial.uma.es/libro/flujos-no-newtonianos-y-reologia_2612/
- Salas, J., Castro, C., Meza, F., & Barragan, K. (2019). *Reometría y tipos de reómetros*. Universidad de Sucre, Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Sincelejo.
- Sánchez, J. (04 de Octubre de 2016). *Análisis de regresión*. Obtenido de Economipedia: <https://economipedia.com/definiciones/analisis-de-regresion.html>
- SEMARNAT. (2007). *Buenas prácticas en sistemas de refrigeración y aire acondicionado*. México DF: ONUDI.
- Shames, I. (1995). *Mecánica de fluidos* (Tercera ed.). New York: McGRAW-HILL. Obtenido de <https://avdiaz.files.wordpress.com/2008/10/mecanica-de-fluidos-shames.pdf>

- TA Instruments. (2019). *Rheology: Theory and Applications*. Waters Corporation, New Castle. Obtenido de <https://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/Boston-Rheology-Training-2019.pdf>
- Vinueza, P. (2016). *Regresión lineal simple y polinomial: teoría y práctica*. UNAM, Centro de Ciencias Genómicas, México. Obtenido de https://www.ccg.unam.mx/~vinueza/R4biosciences/docs/Tema9_regresion.pdf
- Whitman, W., & Johnson, W. (2006). *Tecnología de la refrigeración y aire acondicionado: Fundamentos* (Cuarta ed., Vol. 1). Madrid: Thomson Paraninfo. Obtenido de https://books.google.com.ec/books?id=0wO-wvmoq_AC&printsec=frontcover&dq=refrigeracion&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=refrigeracion&f=false
- Zapata, F. (12 de Diciembre de 2019). *Nueve conductores de calor y sus características*. Obtenido de Liferder: <https://www.liferder.com/conductores-de-calor/>

Apéndices