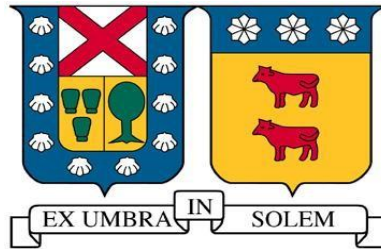


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



“Diseño y Construcción de Banco de Carga Resistivo
para Motor Ciclo Otto Kubota DG972-E2”

Autor: Cristóbal Nicolás Olave Luarte

MEMORIA DE TITULACION PARA OBTAR AL TITULO DE INGENIERO
CIVIL MECÁNICO

Memoria de Titulación financiada por el Proyecto Fondecyt N°1241883

Profesor Guía: Dr. Germán Amador Diaz.

Profesor Correferente: Dr. Roberto Leiva-Illanes

Diciembre- 2024

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi profundo agradecimiento a mi familia. Aunque no estuvieron físicamente presentes en ciertos momentos, siempre me brindaron su apoyo económico y emocional, demostrando paciencia, tolerancia y comprensión, lo cual fue invaluable para mí.

Quiero reconocer especialmente a mis padres quienes me han apoyado incondicionalmente durante todo este tiempo y que siempre están ahí para mí.

Agradezco de corazón a mis compañeros de universidad y de la pensión, quienes compartieron conmigo estos años maravillosos y supieron ver lo mejor de mí incluso en mis momentos más difíciles.

No puedo dejar de agradecer a los docentes los cuales siempre ofrecían una mano de ayuda cuando se lo requería, apoyando o dando una guía para poder avanzar el camino universitario.

Finalmente, mi gratitud se extiende a todas las personas que han sido parte de mi vida hasta ahora, tanto aquellas que dejaron una huella positiva como aquellas que representaron desafíos. De cada una de ellas he aprendido valiosas lecciones que me han guiado en el camino que he recorrido hasta el día de hoy.

RESUMEN

Este proyecto aborda el diseño, construcción y validación de un banco de carga resistivo para el motor Ciclo Otto Kubota DG972-E2. El objetivo fue desarrollar un equipo funcional que permitiera evaluar el desempeño del motor bajo condiciones controladas, asegurando mediciones precisas y seguras.

El banco se diseñó considerando un sistema eléctrico modular, una estructura de soporte robusta y un sistema de enfriamiento basado en convección forzada en bancos de tubos. Se emplearon materiales económicos y accesibles, como resistencias de cuarzo y acero estructural, optimizando recursos sin comprometer el desempeño técnico.

Durante la construcción, se realizaron ajustes clave, como la mejora de placas de soporte y la sustitución de ventiladores para asegurar la funcionalidad del equipo. El proceso incluyó corte, soldadura y ensamblaje, cumpliendo con las especificaciones técnicas establecidas.

La validación del banco confirmó su operatividad en condiciones reales. El sistema eléctrico alcanzó un consumo máximo probado de 3500 W, limitado por la red eléctrica disponible, con un desempeño estable de todos los circuitos. El sistema de ventilación demostró ser efectivo en la disipación de calor, aunque se identificaron oportunidades de mejora en su eficiencia. La estructura soportó las cargas operativas sin fallas, garantizando su robustez.

En conclusión, el banco de carga resistivo cumple con los objetivos del proyecto, ofreciendo una herramienta funcional y segura para pruebas de motores. Este desarrollo constituye un aporte valioso para aplicaciones académicas e industriales, con posibilidades de futuras mejoras y extensiones en su diseño.

ABSTRACT

This project addresses the design, construction, and validation of a resistive load bank for the Kubota DG972-E2 Otto Cycle engine. The objective was to develop a functional device capable of evaluating the engine's performance under controlled conditions, ensuring precise and safe measurements.

The load bank was designed with a modular electrical system, a robust support structure, and a cooling system based on forced convection in tube banks. Cost-effective and readily available materials, such as quartz resistors and structural steel, were utilized to optimize resources without compromising technical performance.

Key adjustments were made during construction, including improvements to support plates and the replacement of fans to ensure the functionality of the system. The process involved cutting, welding, and assembly, adhering to the established technical specifications.

The validation process confirmed the operational performance of the load bank under real-world conditions. The electrical system reached a maximum tested consumption of 3500 W, limited by the available electrical network, with stable performance across all circuits. The ventilation system effectively dissipated heat, though opportunities for efficiency improvements were identified. The structure withstood operational loads without failures, ensuring its robustness.

In conclusion, the resistive load bank meets the project's objectives, providing a functional and safe tool for engine testing. This development represents a valuable contribution for academic and industrial applications, with potential for future improvements and design enhancements.

GLOSARIO

Banco de Carga: Dispositivo utilizado para simular cargas eléctricas y probar el rendimiento y la eficiencia de sistemas eléctricos o motores bajo condiciones específicas.

Carga Resistiva: Tipo de carga eléctrica donde la energía se disipa en forma de calor a través de resistencias, comúnmente utilizada en bancos de carga.

Convección Forzada: Proceso de transferencia de calor facilitado por fuerzas externas, como ventiladores, que mueven un fluido (aire) a través de una superficie caliente.

Resistencia de Cuarzo: Elemento calefactor fabricado con cuarzo que genera calor al pasar corriente eléctrica a través de él, usado comúnmente en calefactores económicos.

Sistema de Enfriamiento: Mecanismo diseñado para eliminar el exceso de calor de un sistema, manteniendo su funcionamiento seguro y eficiente.

Acero Estructural: Categoría de acero utilizada en construcciones, conocida por su resistencia y durabilidad.

Electroventilador: Ventilador o soplador accionado por un motor eléctrico, empleado en sistemas de ventilación para generar flujo de aire.

Anemómetro: Dispositivo utilizado para medir la velocidad y presión del flujo de aire, empleado frecuentemente en sistemas de ventilación y enfriamiento.

Interruptor (Switch): Componente eléctrico que controla el flujo de corriente, permitiendo la activación o desactivación de circuitos.

Indicador LED: Pequeña luz LED que proporciona retroalimentación visual sobre el estado de un circuito o sistema eléctrico.

Número de Reynolds (ReD): Cantidad adimensional utilizada en mecánica de fluidos para predecir el régimen de flujo (laminar o turbulento) basado en la velocidad, densidad, viscosidad y longitud característica del fluido.

Número de Nusselt (NuD): Número adimensional que representa la relación entre la transferencia de calor por convección y por conducción en un sistema fluido.

Coefficiente de Transferencia de Calor (h): Parámetro que cuantifica la tasa de transferencia de calor entre una superficie y un fluido por unidad de área y diferencia de temperatura.

Número de Prandtl (Pr): Número adimensional que representa la relación entre la difusividad de momento y la difusividad térmica en un fluido.

Diferencia de Temperatura (ΔT): Diferencia de temperatura entre dos puntos, utilizada frecuentemente para calcular la transferencia de calor.

Voltaje (V): Parámetro eléctrico que representa la diferencia de potencial entre dos puntos, medido en voltios (V).

Corriente (A): Flujo de carga eléctrica en un circuito, medido en amperios (A).

Potencia (W): Tasa a la que se transfiere o consume energía en un sistema, medida en vatios (W).

Placa de Zinc Alum: Tipo de lámina metálica con recubrimiento de zinc y aluminio para resistencia a la corrosión, utilizada en diversas aplicaciones, incluidas las cubiertas estructurales.

Calota: Cubierta protectora o envolvente utilizada para alojar y proteger componentes eléctricos, como interruptores automáticos y diferenciales.

ÍNDICE

CAPITULO 1. Introducción	11
Motivación.....	12
1.1 Antecedentes.....	13
1.1.1 Motores de combustión interna y el Kubota DG972-E2.....	13
1.1.1.1. Moteres de combustión interna.....	13
1.1.1.2. Motor Kubota DG972-E2: características y aplicaciones.....	15
1.1.1.3. Especificaciones técnicas del Motor.....	16
1.1.2. Bancos de carga	18
1.1.2.1. Función y aplicación de Bancos de carga.....	19
1.1.2.2. Principales funciones de los Bancos de carga.....	20
1.1.2.3. Tipos de Bancos de carga.....	22
1.2. Objetivos.....	33
CAPITULO 2. Marco teórico.....	34
2.1 Bancos de carga resistivos.....	35
2.1.1. Definición y principio de funcionamiento.....	35
2.1.2. Componentes principales.....	36
2.1.2.1. Resistencias.....	36
2.1.2.2. Sistema de enfriamiento.....	42
2.1.2.3. Dispositivos de medición.....	63
2.1.2.4. Estructura de soporte... ..	64
2.1.2.5. Panel de control.....	66
CAPITULO 3. Diseño del Banco de carga resistivo.....	68
3.1 Diseño conceptual.....	69
3.2 Diseño del sistema eléctrico.....	77
3.2.1. Componentes principales del sistema eléctrico.....	78
3.2.2. Esquema eléctrico.....	90
3.2.3. Justificación del diseño del sistema eléctrico.....	92
3.3. Diseño estructural del Banco de carga resistivo.....	94

3.4. Diseño del sistema de enfriamiento.....	98
3.4.1. Principio de funcionamiento de la convección externa forzada en bancos de tubos.....	100
3.4.2. Cálculos para el diseño del sistema de enfriamiento.....	102
3.5. Conclusión del diseño del Banco de carga.....	115
Capítulo 4. Construcción del Banco de carga resistivo.....	116
4.1. Herramientas utilizadas en la construcción.....	117
4.2. Materiales empleados.....	118
4.3. Etapas de construcción.....	122
4.4. Desafíos y ajustes durante la Construcción.....	135
4.5. Costos y recursos Utilizados.....	137
4.6. Conclusión de la construcción del Banco de carga resistivo.....	139
CAPITULO 5. Validación del Banco de carga resistivo.....	140
5.1. Pruebas realizadas.....	141
5.2. Metodología de validación.....	143
5.3. Resultados de las pruebas.....	145
5.4. Análisis de resultados.....	147
CONCLUSION.....	151
Referencias.....	152
Anexo.....	153

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Esquema de las fases del ciclo Otto en un motor de combustión interna.....	14
Figura 2. Motor Kubota DG972-E2 con potencia nominal de 17,6 kW a 3600 rpm.....	15
Figura 3. Curvas de rendimiento del motor Kubota DG972-E2: potencia, torque y consumo específico de combustible en función de la velocidad de giro.....	17
Figura 4. Banco de carga resistivo Avtron serie 2000.....	18
Figura 5. Banco de carga resistivo utilizado para pruebas de descarga en baterías estacionarias.....	20
Figura 6. Banco de carga utilizado para pruebas de generadores de alta tensión.....	21
Figura 7. Resistencias para bancos de carga de la serie HCLB.....	24
Figura 8. Bobinas inductivas utilizadas en bancos de carga para pruebas de generadores....	25
Figura 9. Banco de carga Capacitivo Avtron serie 6000 (modelo 6112).....	28
Figura 10. Bancos de carga combinados serie C de Hilkar.....	30
Figura 11. Banco de carga electrónico de alta precisión (1800W-2400W)	32
Figura 12. Representación del efecto Joule y sus aplicaciones como la calefacción.....	36
Figura 13. Resistencia de alambre bobinado Danotherm modelo HS50.....	38
Figura 14. Resistencias de cuarzo utilizadas en aplicaciones industriales.....	39
Figura 15. Representación de resistencias conectadas en serie.....	40
Figura 16. Representación de resistencias conectadas en paralelo.....	41
Figura 17. Configuración alineada de los tubos en los bancos.....	44
Figura 18. Configuración escalonada de los tubos en los bancos.....	45
Tabla 1. Correlaciones del número de Nusselt para flujo cruzado sobre bancos de tubos, para $NL > 16$ y $0.7 < Pr < 500$ (tomado de Zukauskas, 1987).....	57
Tabla 2. Factor de corrección F que debe usarse en Nu_D , $NL \geq 16 = F * Nu_D$ para $NL < 16$ y $Re_D > 1\ 000$ (tomado de Zukauskas, 1987).....	59
Figura 19. Distribución de las resistencias y ubicación del ventilador en el banco de carga resistivo.....	72
Figura 20. Distribución de las resistencias y sus soportes.....	73
Figura 21. Disposición del sistema de enfriamiento.....	74

Figura 22. Resistencia de estufas de cuarzo.....	79
Figura 23. Interruptor doble modelo Xunma XM1-23.....	81
Figura 24. Indicador luminoso LED modelo AD22-22DS.....	82
Figura 25. Interruptor automático monopolar de 32A, curva C.....	83
Figura 26. Interruptor diferencial bipolo de 25A, 30mA, marca Lexo.....	84
Figura 27. Medidor de parámetros eléctricos Peacefair modelo PZEM-061.....	85
Figura 28. Diseño del panel de control del banco de carga resistivo, mostrando la disposición de los componentes principales.....	86
Figura 29. Diseño del diagrama eléctrico del Banco de Carga.....	91
Figura 30. Estructura del Banco de Carga Resistivo.....	94
Figura 31. Perfil ángulo de acero de 30x30x2 mm.....	95
Figura 32. Visualización de las tapas cubriendo la estructura.....	96
Tabla 3. Tabla de Parámetros físicos del Aire a 20°C, 1atm y una humedad relativa del 75% al 85%.....	102
Tabla 4. Tabla de Parámetros Geométricos de la configuración escalonada.....	104
Tabla 5. Valores Medidos de Temperatura Superficial de las Resistencias.....	105
Tabla 6. Valores promedio de la temperatura del aire y numero de Prandtl del aire en la superficie.....	105
Figura 33. Relación entre la Velocidad del Aire en el Ventilador y la Velocidad Máxima en el Banco de Tubos.....	106
Figura 34. Relación entre la Velocidad del Aire en el Ventilador y El número de Reynols.....	107
Figura 35. Relación entre la Velocidad del Aire en el Ventilador y El número de Nusselt.....	108
Figura 36. Relación entre la Velocidad del Aire en el Ventilador y El número de Nusselt corregido.....	109
Figura 37. Relación entre la Velocidad del Aire en el Ventilador y El coeficiente de transferencia de calor.....	109
Figura 38. Relación entre la Velocidad del Aire en el Ventilador y El flujo másico.....	110
Figura 39. Relación entre la Velocidad del Aire en el Ventilador y la Temperatura del aire a la salida del banco.....	111

Figura 40. Relación entre la Velocidad del Aire en el Ventilador y la Transferencia total de calor.....	112
Tabla 7. Tabla de los parámetros clave obtenidos para el rango de trabajo del ventilador seleccionado.....	113-114
Figura 41. Corte de perfil metálico utilizando una esmeriladora angular.....	122
Figura 42. Cuadro soldado utilizando perfiles metálicos.....	123
Figura 43. Estructura base soldada utilizando perfiles metálicos.....	123
Figura 44. Estructura del banco ya completada, realizando revisión de diagonales.....	124
Figura 45. Estructura del banco ya pintada con ventilador, extractor y ruedas instalados.....	125
Figura 46. Preparación del Panel de Control, realizando cortes con cierra caladora.....	128
Figura 47. Planchas fijadas a la estructura mientras se van realizando los agujeros correspondientes.....	128
Figura 48. Preparación de las placas de soporte para las resistencias.....	129
Figura 49. Realización del proceso de aplicación de pintura Anticorrosiva en las planchas.....	130
Figura 50. Resistencias instaladas al interior del Banco de Carga Resistivo.....	131
Figura 51. Parte del cableado del Panel de control.....	132
Figura 52. Visualización del cableado interno con las resistencias y el extractor.....	133
Figura 53. Visualización de la puesta en marcha del Banco de Carga resistivo.....	134
Tabla 8. Tabla de Costos y Recursos Utilizados del Proyecto.....	138
Tabla 9. Datos Obtenidos durante las Pruebas de Validación.....	145
Figura 54. Grafica comparativa de potencia de diseño con la potencia consumida.....	151
Figura 55. Relación entre la potencia consumida y la temperatura medida en la rejilla de salida.....	152

CAPITULO 1. Introducción

Motivación

En el contexto del Laboratorio de Termofluidos de la Universidad Técnica Federico Santa María, la ausencia de un banco de carga resistivo diseñado específicamente para el motor Ciclo Otto Kubota DG972-E2 representa un obstáculo significativo para realizar pruebas que permitan evaluar su rendimiento bajo distintas condiciones operativas. Este vacío técnico no solo dificulta la obtención de datos confiables para la optimización del motor, sino que también restringe la capacidad de llevar a cabo investigaciones enfocadas en el desarrollo de tecnologías relacionadas con combustibles alternativos y energías sostenibles.

La principal motivación de este proyecto radica en la necesidad de disponer de una herramienta que permita analizar de manera precisa y replicable el comportamiento de este motor, utilizado en el laboratorio con fines de investigación. La creación de un banco de carga resistivo no solo facilitará estas pruebas, sino que además servirá como modelo replicable y adaptable en futuros desarrollos relacionados con motores de características similares.

El motor Kubota DG972-E2, con su capacidad para operar con combustibles alternativos como el gas de gasificación y el gas licuado de petróleo (GLP), constituye una opción versátil y relevante en el marco de la sostenibilidad. Sin embargo, la inexistencia de un equipo de ensayo apropiado ha limitado hasta el momento el potencial de investigación asociado a este motor dentro del laboratorio. Este proyecto busca superar estas barreras mediante el diseño y construcción de un banco de carga resistivo que permita evaluar de manera integral su desempeño, contribuyendo tanto al avance de las líneas de investigación como a la optimización de su eficiencia.

En síntesis, este trabajo tiene como propósito ofrecer una solución práctica a una necesidad concreta del laboratorio, al mismo tiempo que abre nuevas oportunidades para explorar aplicaciones relacionadas con el uso de combustibles más limpios y sostenibles.

1.1. Antecedentes

Para desarrollar una solución adecuada y efectiva que responda a las necesidades planteadas en este proyecto, es fundamental comprender el contexto técnico y conceptual que lo sustenta. Esto incluye el análisis de los motores de combustión interna, con énfasis en el motor Kubota DG972-E2, así como una revisión de las herramientas disponibles para evaluar su rendimiento, como los bancos de carga. Los antecedentes técnicos y teóricos proporcionan una base esencial para entender los desafíos y oportunidades asociados con el diseño y construcción del banco de carga resistivo, elemento clave de esta investigación.

1.1.1. Motores de combustión interna y el Kubota DG972-E2

1.1.1.1. Motores de combustión interna

Los motores de combustión interna han desempeñado un papel fundamental en el desarrollo industrial y tecnológico desde su invención. Debido a su capacidad para transformar la energía química de los combustibles en energía mecánica, han facilitado el avance de numerosas aplicaciones en sectores como el transporte, la generación de energía, la maquinaria agrícola y diversas actividades industriales. Su versatilidad y eficiencia han consolidado su relevancia tecnológica a lo largo de más de un siglo.

El funcionamiento básico de estos motores se basa en la combustión controlada de un combustible dentro de una cámara cerrada, donde se generan gases a alta presión que impulsan el movimiento mecánico. Este principio, aunque simple en su concepción, ha evolucionado de manera significativa para adaptarse a diferentes requerimientos, dando lugar a distintas configuraciones, como los motores de ciclo Otto, ciclo Diesel y ciclo Atkinson.

En particular, los motores de ciclo Otto destacan por emplear una mezcla de aire y combustible que se comprime y se enciende mediante una chispa. Este diseño los hace especialmente adecuados para aplicaciones que requieren un funcionamiento confiable y adaptable, como generadores estacionarios y maquinaria agrícola. Su capacidad para operar en condiciones variables, junto con su diseño relativamente sencillo, ha contribuido a su popularidad en estos contextos.

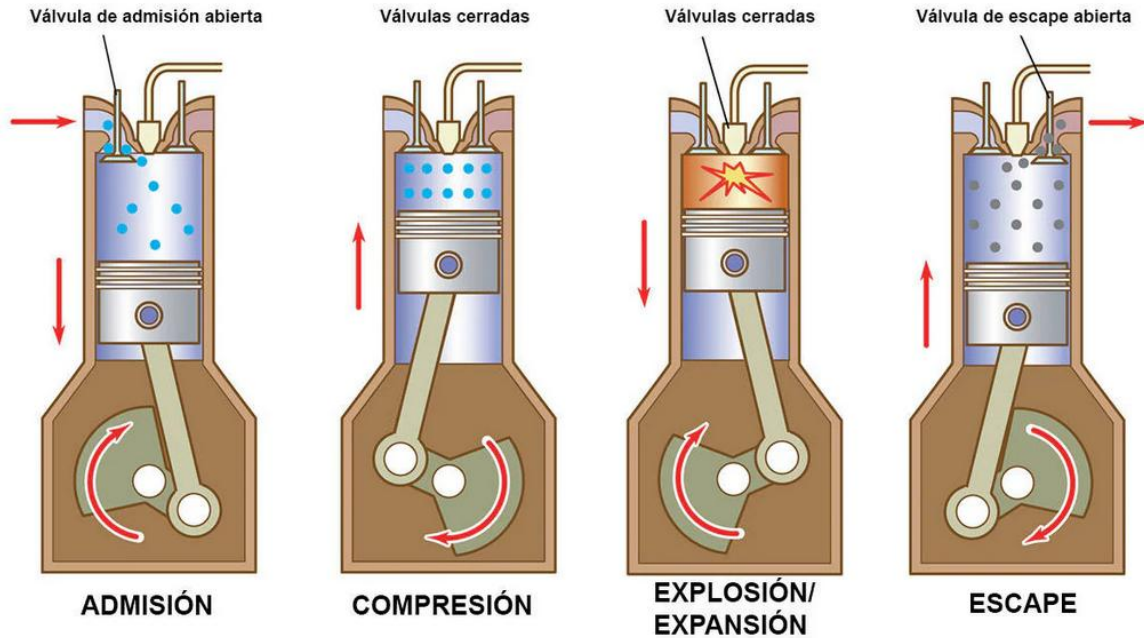


Figura 1. Esquema de las fases del ciclo Otto en un motor de combustión interna

Fuente: Autocasión. (2023). *Ciclo Otto*. Autocasión. Recuperado de <https://www.autocasion.com/diccionario/ciclo-otto>

No obstante, los motores de combustión interna enfrentan desafíos significativos en el contexto actual, donde la sostenibilidad y la reducción de emisiones contaminantes se han convertido en prioridades globales. La adaptación de estos motores para operar con combustibles más limpios y sostenibles, como el gas de gasificación y el gas licuado de petróleo (GLP), ha generado nuevas oportunidades para el desarrollo tecnológico. Estas modificaciones requieren herramientas especializadas que permitan evaluar su desempeño de manera precisa y en condiciones controladas, garantizando tanto su eficiencia como su confiabilidad en estas aplicaciones.

En este contexto, los motores de combustión interna continúan siendo relevantes y representan un campo de estudio activo, enfocado en el desarrollo de soluciones sostenibles y tecnológicamente avanzadas para responder a las necesidades actuales de la industria y la sociedad.

1.1.1.2. Motor Kubota DG972-E2: características y aplicaciones



Figura 2. Motor Kubota DG972-E2 con potencia nominal de 17,6 kW a 3600 rpm

Fuente: Kubota Corporation. (2019). *DG972-E2: Especificaciones técnicas*. Frontier Power Products. Recuperado de <https://www.frontierpower.com/wp-content/uploads/2019/11/DG972-E2.pdf>

El motor Kubota DG972-E2 es un motor de ciclo Otto diseñado para operar exclusivamente con gas natural, característica que lo posiciona como una opción eficiente para aplicaciones estacionarias. Este modelo forma parte de la serie DG de Kubota, conocida por integrar la durabilidad y confiabilidad de los motores industriales de la marca con un diseño optimizado para combustibles gaseosos.

Entre las principales especificaciones técnicas del motor se incluyen:

- **Diseño compacto y eficiente:** Configurado con tres cilindros y una cilindrada de 0,962 litros, alcanza una potencia máxima de 17,6 kW (23,6 HP) a 3600 rpm.
- **Cumplimiento de normativas ambientales:** Satisface los requerimientos de emisiones establecidos en la normativa EPA Phase 3, contribuyendo a un menor impacto ambiental en su operación.
- **Simplicidad en el mantenimiento:** Su sistema de gobernador mecánico y componentes resistentes al agua permiten minimizar costos y tiempos asociados al mantenimiento, especialmente en aplicaciones exteriores.
- **Enfoque en aplicaciones estacionarias:** Está diseñado para generadores eléctricos y maquinaria agrícola, ofreciendo confiabilidad en entornos de trabajo exigentes.

Una característica destacada del DG972-E2 es su diseño basado en motores diésel como el Kubota D902, lo que proporciona una flexibilidad estructural que permite considerar adaptaciones a combustibles alternativos, como el gas licuado de petróleo (GLP) o el gas de gasificación. Esta cualidad resulta particularmente relevante en el contexto de la transición hacia fuentes de energía más sostenibles.

Dadas sus características técnicas y capacidades, este motor se presenta como un caso adecuado para su evaluación mediante un banco de carga resistivo. Dicho análisis facilitará el estudio de su desempeño en condiciones controladas y permitirá explorar su potencial para operar con combustibles alternativos en aplicaciones industriales y agrícolas.

1.1.1.3. Especificaciones técnicas del Motor

Por otra parte, para comprender de manera más detallada el motor Kubota DG972-E2 y su relevancia en este proyecto, resulta necesario examinar sus principales características técnicas. Este motor está diseñado para aplicaciones estacionarias que requieren altos niveles de confiabilidad y eficiencia, especialmente en entornos exigentes, como los presentes en la industria y la agricultura.

El diseño del motor, optimizado para operar con gas natural, y su cumplimiento con normativas ambientales estrictas evidencian su capacidad para responder a los desafíos tecnológicos actuales. A continuación, se detallan sus especificaciones técnicas más relevantes, las cuales proporcionan un marco para evaluar sus capacidades y potencial en el contexto de este proyecto:

Especificaciones técnicas del Motor Kubota DG972-E2

- **Modelo:** DG972-E2
- **Regulación de emisiones:** Cumple con **EPA Phase 3**.
- **Cilindros:** 3, en disposición vertical.
- **Ciclo:** 4 tiempos, refrigerado por líquido.
- **Tipo de combustible:** Gas natural (diseñado específicamente para este uso).
- **Sistema de admisión:** Naturalmente aspirado.
- **Desplazamiento:** 0,962 litros (58,7 pulgadas cúbicas).
- **Potencia máxima:** 17,6 kW (23,6 HP) a 3600 rpm.

- **Sentido de rotación:** Contrarreloj (visto desde el volante).
- **Capacidad del cárter de aceite:** 3,7 litros (0,98 galones).
- **Capacidad del sistema de arranque:** 12V – 1,0 kW.
- **Alternador:** 12V - 40A.
- **Dimensiones:**
 - Longitud: 525,5 mm (20,69 pulgadas).
 - Anchura: 415,4 mm (16,35 pulgadas).
 - Altura: 502,5 mm (19,78 pulgadas).
- **Peso en seco:** 95,4 kg (210,3 lbs).

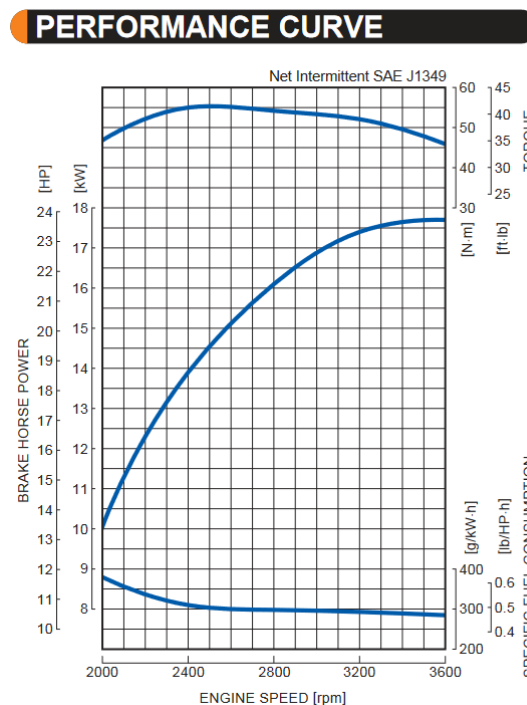


Figura 3. Curvas de rendimiento del motor Kubota DG972-E2: potencia, torque y consumo específico de combustible en función de la velocidad de giro.

Fuente: Kubota Corporation. (2019). *DG972-E2: Especificaciones técnicas*. Frontier Power Products. Recuperado de <https://www.frontierpower.com/wp-content/uploads/2019/11/DG972-E2.pdf>

La revisión de estas especificaciones técnicas destaca la necesidad de contar con una herramienta adecuada para evaluar el desempeño del motor en condiciones controladas. Su diseño especializado para operar con gas natural y su potencial adaptabilidad a combustibles alternativos subrayan la importancia de analizar su comportamiento bajo diferentes niveles de carga y condiciones operativas.

El diseño y la construcción de un banco de carga resistivo personalizado permitirán validar el rendimiento del motor Kubota DG972-E2 y evaluar su eficiencia en un contexto práctico. Este enfoque no solo contribuirá a optimizar su desempeño en aplicaciones actuales, sino que también proporcionará una base para futuras investigaciones relacionadas con su operación utilizando combustibles más sostenibles.

1.1.2. Bancos de carga

Los bancos de carga son herramientas fundamentales para emular y evaluar la demanda eléctrica o mecánica a la que estarán sometidos sistemas, equipos o dispositivos en condiciones reales de operación. Su propósito principal es reproducir escenarios de carga específicos con el fin de analizar el rendimiento, la capacidad y la eficiencia de sistemas de energía como generadores, baterías, fuentes de alimentación, motores y otros dispositivos eléctricos o mecánicos.

Estos dispositivos son ampliamente utilizados en diversos campos de la ingeniería, ya que permiten llevar a cabo pruebas controladas que garantizan la confiabilidad y el desempeño de los sistemas evaluados. Mediante la simulación de diferentes niveles de carga, los bancos de carga proporcionan datos precisos que facilitan la identificación de posibles fallos, la optimización del funcionamiento de los equipos y el aseguramiento del cumplimiento de los estándares de calidad establecidos.



Figura 4. Banco de carga resistivo Avtron serie 2000.

Fuente: Avtron Power. (n.d.). *Load Bank Series Features*. Recuperado de <https://avtronpower.com/es/resources/load-bank-series-features/>

1.1.2.1. Función y aplicación de los Bancos de carga

Los bancos de carga tienen como objetivo principal emular condiciones reales de carga en sistemas eléctricos o mecánicos, lo que permite evaluar su rendimiento y confiabilidad. Mediante esta simulación, es posible medir el desempeño, identificar fallas potenciales, optimizar la eficiencia y garantizar el cumplimiento de normativas técnicas.

En el ámbito eléctrico, los bancos de carga se utilizan para simular diferentes niveles de consumo eléctrico al absorber energía de un sistema y transformarla en calor o en otras formas de energía disipada, en lugar de almacenarla. Esto resulta especialmente útil para probar generadores eléctricos bajo cargas variables, evaluando su capacidad para producir energía de manera continua y analizando su estabilidad en diversas condiciones. Además, los bancos de carga son esenciales en el desarrollo y pruebas de baterías, ya que permiten aplicar ciclos controlados de carga y descarga para evaluar su capacidad, durabilidad y eficiencia en escenarios reales.

La versatilidad de los bancos de carga permite que sean utilizados en múltiples áreas, como:

- **Pruebas de generadores eléctricos:** En las pruebas de generadores eléctricos, se evalúa la capacidad y estabilidad de los equipos frente a diferentes demandas, además de simular condiciones de carga máxima para analizar su respuesta ante posibles fallas.
- **Análisis de motores de combustión interna:** se verifica el rendimiento de motores estacionarios bajo diversas cargas, validando parámetros como potencia, consumo de combustible y eficiencia, especialmente en motores como el Kubota DG972-E2.
- **Pruebas de baterías y sistemas de almacenamiento:** se determina su capacidad, vida útil y eficiencia energética en condiciones reales, mediante ensayos controlados de carga y descarga que garantizan su rendimiento.



Figura 5. Banco de carga resistivo utilizado para pruebas de descarga en baterías estacionarias.

Fuente: Energy DCAC. (2023). *Prueba de descarga en batería estacionaria: Temperatura y resistencia interna*. Recuperado de <https://energydcac.com/prueba-descarga-bateria-estacionaria-temperatura-resistencia-interna/>

- **Investigación y desarrollo:** se trabaja en el diseño de nuevos prototipos en universidades o centros de investigación, además de evaluar motores adaptados a combustibles alternativos como el GLP o el gas de gasificación.
- **Mantenimiento predictivo:** se enfoca en la detección temprana de problemas y la calibración de equipos antes de su implementación en el campo, lo que permite reducir tiempos de inactividad y minimizar costos asociados a reparaciones no planificadas.

1.1.2.2. Principales funciones de los Bancos de Carga

Desde una perspectiva eléctrica, los bancos de carga se utilizan para emular distintos niveles de consumo eléctrico mediante la absorción de energía de un sistema y su transformación en calor u otras formas de energía disipada, en lugar de almacenarla. Esta capacidad los convierte en herramientas fundamentales para evaluar y garantizar la confiabilidad de diversos sistemas de energía.

Los bancos de carga desempeñan un papel crucial en la validación, desarrollo y mantenimiento de sistemas eléctricos y mecánicos. Al ofrecer un entorno controlado y seguro, permiten analizar el rendimiento de estos sistemas bajo condiciones simuladas, asegurando su eficiencia, confiabilidad y cumplimiento con los estándares técnicos establecidos. Entre sus principales funciones se destacan:

- **Simulación de condiciones reales o pruebas de rendimiento:** Evaluar la capacidad y el comportamiento de sistemas o equipos al someterlos a diferentes niveles de carga

controladas, replicando condiciones reales de funcionamiento. Esto es crucial para analizar su estabilidad y respuesta operativa.

- **Evaluación de generadores eléctricos:** Son esenciales para someter a prueba generadores, evaluando su capacidad para producir energía continua y su estabilidad operativa en diversas condiciones.



Figura 6. Banco de carga utilizado para pruebas de generadores de alta tensión

Fuente: Weld Power. (n.d.). *Load Bank Testing for Generators*. Recuperado de <https://weldpower.com/generator-service/load-bank-testing/>

- **Pruebas de baterías y almacenamiento energético:** Aplican cargas y descargas controladas para analizar la capacidad, durabilidad y eficiencia de baterías bajo condiciones similares a las reales.
- **Validación de sistemas mecánicos y eléctricos:** Facilitan el análisis de motores y sistemas eléctricos en condiciones de operación críticas, ayudando a detectar fallas y optimizar su desempeño.
- **Diagnóstico de Fallos:** Identificar posibles problemas o debilidades en sistemas o dispositivos al aplicar cargas controladas. Esto facilita la detección temprana de fallos, reduciendo el riesgo de fallas inesperadas en aplicaciones reales.
- **Optimización de Diseño:** Contribuir al desarrollo de sistemas más eficientes y duraderos mediante pruebas exhaustivas que permitan mejorar su diseño, aumentando la vida útil y reduciendo costos operativos.
- **Verificación de Especificaciones:** Comprobar que los equipos cumplen con las especificaciones técnicas y los requisitos de rendimiento preestablecidos, asegurando que sean aptos para sus aplicaciones previstas.

- **Calibración y Ajuste:** Ajustar y calibrar sistemas para optimizar su funcionamiento bajo cargas específicas, asegurando que operen de manera eficiente en su entorno de trabajo.

En resumen, los bancos de carga no solo permiten validar el rendimiento de los sistemas, sino que también son herramientas clave para garantizar su confiabilidad y eficiencia, ayudando a cumplir con los estándares de calidad y seguridad requeridos.

1.1.2.3. Tipos de Bancos de carga

Existen diferentes tipos de bancos de carga, cada uno diseñado para simular distintos tipos de demanda y responder a necesidades específicas en el análisis de sistemas eléctricos y mecánicos. Los principales tipos son:

I. Bancos de carga resistivos:

Un banco de carga resistivo es un dispositivo diseñado para simular una carga eléctrica puramente resistiva, similar a la que generan dispositivos como bombillas y calentadores eléctricos, en condiciones de prueba o simulación. Estos bancos están compuestos por elementos resistivos que disipan la energía eléctrica en forma de calor, permitiendo reproducir cargas constantes de manera precisa y controlada. La función principal de un banco de carga resistivo es proporcionar una carga estable y controlada para probar o verificar el rendimiento de sistemas eléctricos y mecánicos. Al aplicar una carga resistiva, es posible evaluar la capacidad de la fuente de energía para suministrar energía de manera eficiente y estable. Esto es especialmente útil en pruebas donde se necesita asegurar la confiabilidad y desempeño de generadores eléctricos, motores estacionarios y otros dispositivos bajo diferentes niveles de carga. Los bancos de carga resistivos tienen una amplia variedad de aplicaciones, entre las que se incluyen:

- Pruebas de generadores, equipos electrógenos y fuentes de alimentación, asegurando que cumplen con los estándares de calidad requeridos.
- Verificación de sistemas de respaldo de energía, como UPS o sistemas de emergencia.

- Ensayos en sistemas de distribución eléctrica, evaluando su estabilidad y capacidad operativa.
- Simulación de cargas eléctricas de alto consumo para analizar la respuesta de los equipos.
- Pruebas de equipos de medición, validando su precisión y confiabilidad.
- Mantenimiento de equipos electrógenos, detectando fallos y optimizando su desempeño antes de su uso en aplicaciones reales.

Ventajas del Banco de carga resistivo

Las ventajas de los bancos de carga resistivos radican en su simplicidad de diseño y operación, lo que los hace fáciles de implementar y más accesibles desde el punto de vista técnico y económico en comparación con otros tipos de bancos de carga. Su capacidad para proporcionar una precisión en la simulación de cargas constantes permite emular cargas puramente resistivas de manera controlada y estable, lo que es ideal para evaluar el rendimiento de equipos bajo condiciones constantes y predecibles.

Además, su versatilidad en aplicaciones los hace útiles en una amplia gama de entornos, desde pruebas de generadores y sistemas de energía hasta la evaluación de motores eléctricos y de combustión interna. Gracias a su diseño mecánico simple, requieren un mantenimiento mínimo, lo que reduce costos operativos a lo largo del tiempo. Su fabricación y operación también son económicas, dado que no incluyen componentes complejos como inductancias o capacitancias.

Los bancos resistivos ofrecen una alta confiabilidad, ya que su funcionamiento estable y predecible los convierte en herramientas ideales para pruebas críticas y repetitivas. Su capacidad de eficiencia en la disipación de energía les permite disipar la energía en forma de calor sin necesidad de almacenamiento ni sistemas de conversión adicionales. Por último, son compatibles con motores estacionarios y sistemas eléctricos simples, siendo especialmente útiles para probar motores como el Kubota DG972-E2 bajo condiciones de carga constante, así como otros sistemas eléctricos básicos.



Figura 7. Resistencias para bancos de carga de la serie HCLB.

Fuente: Ohmite Manufacturing. (n.d.). *HCLB Series: High Current Load Banks*. Recuperado de <https://www.ohmite.com/hclb-series/>

II. Bancos de carga reactivos: Inductivos y Capacitivos

Los bancos de carga reactivos se clasifican en dos categorías principales: inductivos y capacitivos, según el tipo de carga que reproducen. Estos dispositivos están diseñados para emular cargas que no son puramente resistivas, permitiendo replicar condiciones más complejas y dinámicas presentes en sistemas eléctricos avanzados.

Bancos de carga inductivos

Los bancos de carga inductivos son dispositivos diseñados específicamente para emular cargas eléctricas de naturaleza inductiva, como las generadas por motores eléctricos, transformadores y otros equipos con componentes electromagnéticos. Su diseño incluye inductores que generan una carga reactiva, permitiendo evaluar el desempeño de sistemas eléctricos bajo condiciones inductivas controladas. Estos dispositivos son fundamentales para replicar y probar las demandas reales en sistemas de potencia críticos, asegurando que los equipos bajo análisis puedan manejar fluctuaciones de carga inductiva de manera eficiente.

Los bancos de carga inductivos se utilizan comúnmente en diversas aplicaciones. En las pruebas de grupos electrógenos marinos, simulan las cargas inductivas generadas por dispositivos como inversores y paquetes de baterías, asegurando su confiabilidad en entornos marítimos exigentes. En instalaciones de investigación y desarrollo, permiten evaluar cómo los sistemas eléctricos responden a fluctuaciones de carga inductiva, contribuyendo al avance tecnológico. Además, en aplicaciones industriales, se emplean para ajustar el factor de

potencia, contrarrestando las cargas inductivas generadas por motores, compresores y sistemas de iluminación, optimizando así el rendimiento energético y la estabilidad operativa.



Figura 8. Bobinas inductivas utilizadas en bancos de carga para pruebas de generadores.

Fuente: Micron Group. (n.d.). *Generator Installation: Inductive Load Banks*. Recuperado de <https://microngroup.com.au/portfolio-item/generator-installation/>

Aplicaciones de los Bancos de carga inductivos

- Pruebas de sistemas eléctricos que enfrentan cargas inductivas: Verificación del desempeño de motores, transformadores y otros dispositivos bajo condiciones inductivas.
- Ajuste de factor de potencia: Reducción de pérdidas en redes eléctricas industriales al contrarrestar las cargas inductivas.
- Pruebas de generadores eléctricos: Ensayos en condiciones de carga inductiva para garantizar su estabilidad operativa.
- Verificación de sistemas de energía: Evaluación de la capacidad de sistemas eléctricos para manejar componentes inductivos.
- Evaluación de transformadores: Análisis de su eficiencia y capacidad para operar bajo fluctuaciones inductivas.
- Simulación de cargas inductivas: Desarrollo y prueba de equipos eléctricos en entornos industriales para replicar condiciones reales.

Los bancos de carga inductivos son fundamentales para garantizar que los sistemas eléctricos funcionen de manera eficiente y estable en escenarios donde las cargas inductivas predominan. Esto es particularmente relevante en aplicaciones críticas como:

- Sistemas industriales donde los motores y transformadores son componentes esenciales.
- Redes eléctricas que requieren ajustes de factor de potencia para evitar pérdidas energéticas.
- Desarrollo de nuevos equipos eléctricos que operan en entornos de alta carga reactiva.

Ventajas de los Bancos de carga inductivos

Las ventajas de los bancos de carga inductivos radican en su capacidad para simular de manera realista las condiciones de carga generadas por equipos como motores eléctricos, transformadores y compresores, proporcionando resultados confiables en pruebas y simulaciones. Estos dispositivos permiten evaluar el desempeño de sistemas eléctricos bajo fluctuaciones en la carga inductiva, un aspecto crucial para garantizar la estabilidad operativa en entornos industriales y comerciales. Además, contribuyen al ajuste del factor de potencia, optimizando la eficiencia energética de las redes eléctricas al contrarrestar cargas inductivas que podrían aumentar las pérdidas.

Su versatilidad los convierte en herramientas valiosas para una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo pruebas en generadores eléctricos, sistemas de energía, equipos de distribución y transformadores, adaptándose a diversas necesidades industriales y de investigación. También son efectivos para la detección temprana de fallas en motores, transformadores y otros dispositivos, ayudando a reducir tiempos de inactividad y costos de mantenimiento.

En el ámbito del desarrollo tecnológico, los bancos inductivos son esenciales en instalaciones de investigación y desarrollo, donde se emplean para diseñar y evaluar equipos eléctricos más eficientes y adaptados a condiciones inductivas específicas. Además, su capacidad para emular cargas inductivas los hace indispensables en aplicaciones críticas, como sistemas marinos, industriales y de infraestructura estratégica, donde la confiabilidad y precisión son fundamentales. Por último, ofrecen la posibilidad de integración permanente en laboratorios e instalaciones industriales para pruebas continuas, lo que los convierte en una solución robusta y duradera para el análisis de sistemas.

Bancos de carga capacitivos

Un banco de carga capacitivo es un dispositivo diseñado para emular cargas eléctricas capacitivas, como las generadas por bancos de condensadores, fuentes de alimentación y otros sistemas electrónicos avanzados. Utilizando capacitores, estos bancos crean una carga reactiva positiva que permite analizar la respuesta de sistemas eléctricos frente a condiciones capacitivas específicas.

Entre sus características principales destaca su capacidad para la emulación de cargas capacitivas, generando potencia reactiva positiva y proporcionando condiciones de prueba realistas para sistemas que incluyen componentes capacitivos. Además, ofrecen una corrección efectiva del factor de potencia, siendo útiles para compensar cargas inductivas en redes eléctricas y mejorar el rendimiento energético del sistema. Su diseño flexible les permite adaptarse a diversas configuraciones eléctricas, lo que los convierte en herramientas ideales para pruebas en redes trifásicas y sistemas de potencia complejos. Estas capacidades hacen de los bancos de carga capacitivos un recurso esencial en el análisis y optimización de sistemas eléctricos avanzados.

Aplicaciones de los Bancos de carga capacitivos

- Pruebas de sistemas eléctricos con cargas capacitivas: Los bancos capacitivos se utilizan para evaluar la estabilidad de sistemas eléctricos y su desempeño bajo condiciones de carga reactiva, como ocurre en redes de transmisión y distribución de energía.
- Corrección del factor de potencia: La principal aplicación de los bancos capacitivos es mejorar el factor de potencia en sistemas eléctricos. Un factor de potencia bajo indica un uso ineficiente de la energía eléctrica debido a la presencia de energía reactiva. Los bancos capacitivos compensan esta energía, reduciendo las pérdidas y optimizando el rendimiento del sistema.
- Pruebas de fuentes de alimentación y UPS: Verificación de la estabilidad y eficiencia de sistemas de respaldo y fuentes de alimentación bajo cargas capacitivas.
- Simulación de redes trifásicas: Emulación de condiciones de carga realistas en redes eléctricas industriales para garantizar su estabilidad y desempeño.

- Desarrollo de sistemas electrónicos avanzados: Ensayos en laboratorios de investigación para evaluar dispositivos que dependen de cargas capacitivas, como inversores y controladores electrónicos.

Ventajas de los Bancos de carga capacitivos

Las ventajas de los bancos de carga capacitivos residen en su capacidad para optimizar el factor de potencia, reduciendo pérdidas de energía y mejorando la eficiencia de los sistemas eléctricos al compensar cargas inductivas presentes. Estos dispositivos permiten la simulación de condiciones de carga capacitiva reales, lo que resulta fundamental para analizar el comportamiento de generadores y redes eléctricas. Además, son esenciales en el desarrollo y evaluación de sistemas de energía renovable, asegurando su desempeño en escenarios prácticos. Su versatilidad les permite adaptarse a múltiples aplicaciones, desde pruebas en generadores eléctricos hasta la simulación de cargas capacitivas en redes de transmisión. También contribuyen a la estabilidad y el balance energético, equilibrando redes eléctricas y contrarrestando cargas reactivas negativas para mantener un suministro confiable. Por último, son herramientas clave para la optimización del diseño de equipos electrónicos avanzados, como inversores y bancos de condensadores, garantizando su estabilidad en condiciones reales de operación.



Figura 9. Banco de carga Capacitivo Avtron serie 6000 (modelo 6112).

Fuente: Avtron Power Solutions. (n.d.). *6112 Load Bank: Resistive-Reactive Load Banks*. Recuperado de <https://avtronpower.com/load-banks/resistive-reactive-load-banks/6112-load-bank/>

III. Bancos de carga combinados:

Los bancos de carga combinados se distinguen por su capacidad para emular cargas eléctricas que integran componentes resistivos, inductivos y capacitivos en proporciones variables. Esta característica les permite replicar condiciones reales de operación en sistemas

eléctricos complejos, donde las cargas suelen ser una combinación de estas propiedades. Gracias a su versatilidad, estos bancos son ampliamente utilizados en pruebas avanzadas de sistemas de potencia, generadores eléctricos y equipos industriales.

Entre sus características principales destaca la capacidad para simular cargas mixtas, combinando resistencias, inductores y capacitores para replicar las condiciones de carga que se encuentran en redes eléctricas, motores y sistemas industriales. Además, ofrecen una configuración flexible, permitiendo ajustar las proporciones de carga resistiva, inductiva y capacitiva según los requerimientos específicos de cada prueba. Por último, proporcionan un análisis integral del comportamiento de los sistemas eléctricos bajo distintos escenarios, generando datos precisos sobre estabilidad, eficiencia y desempeño. Estas capacidades los convierten en herramientas esenciales para evaluar y optimizar el rendimiento de sistemas eléctricos complejos.

Aplicaciones de los Bancos de carga combinados

- Pruebas de generadores eléctricos y sistemas de potencia: Simulan condiciones de carga reales para garantizar que los generadores puedan manejar demandas variables y mixtas.
- Evaluación de redes de distribución y transmisión Eléctrica: Analizan la estabilidad y el equilibrio energético en sistemas trifásicos bajo diferentes configuraciones de carga.
- Pruebas de motores y transformadores: Permiten evaluar el desempeño de motores eléctricos y transformadores en condiciones mixtas, como las encontradas en entornos industriales.
- Desarrollo de tecnologías renovables y electrónicas: Son útiles en la validación de inversores y sistemas de energía renovable, donde las cargas mixtas son comunes.
- Optimización de sistemas eléctricos: Ayudan a identificar problemas y optimizar sistemas que operan en escenarios con demandas diversas, mejorando su eficiencia y estabilidad.

Ventajas de los Bancos de carga combinados

Las ventajas de los bancos de carga combinados se basan en su capacidad para simular de manera realista las condiciones de operación encontradas en sistemas eléctricos complejos, lo que permite realizar un análisis integral y confiable. Estos dispositivos destacan por su versatilidad, ya que pueden adaptarse a diferentes escenarios ajustando las proporciones de carga resistiva, inductiva y capacitiva según las necesidades específicas. Además, ofrecen pruebas de alta precisión, proporcionando datos detallados sobre el desempeño y la estabilidad de los sistemas eléctricos bajo cargas variables. Su amplitud de aplicaciones los hace ideales para probar equipos avanzados, como generadores trifásicos, motores eléctricos y sistemas de energía renovable. Asimismo, su capacidad para incluir componentes reactivos permite la corrección del factor de potencia, contribuyendo al equilibrio y optimización del desempeño energético en redes eléctricas.



Figura 10. Bancos de carga combinados serie C de Hilkar.

Fuente: Hilkar. (n.d.). *Bancos de carga combinados: Serie C*. Recuperado de <https://hilkar.com/es/combinadoseriec.html>

IV. Bancos de carga electrónicos:

Un banco de carga electrónico es un dispositivo avanzado diseñado para simular cargas dinámicas y precisas mediante el uso de circuitos electrónicos y sistemas de control digital. A diferencia de los bancos resistivos, inductivos, capacitivos o combinados, los bancos electrónicos ofrecen un control altamente preciso, permitiendo ajustar parámetros como corriente, voltaje y potencia en tiempo real. Esto los convierte en una herramienta ideal para pruebas de dispositivos modernos, como baterías, fuentes de alimentación, sistemas UPS y equipos electrónicos sensibles.

Sus características principales incluyen un control digital preciso, que permite programar el dispositivo para simular cargas complejas y dinámicas, ajustando continuamente las condiciones de prueba según los requerimientos específicos. Además, ofrecen una alta flexibilidad, emulando cargas resistivas, inductivas y capacitivas, con la capacidad de replicar cambios de carga en tiempo real. Por último, incorporan instrumentos de medición avanzados que registran datos detallados, como potencia, corriente y voltaje, proporcionando análisis detallados durante las pruebas. Estas capacidades hacen de los bancos de carga electrónicos herramientas indispensables en la validación y desarrollo de tecnologías avanzadas.

Aplicaciones de los Bancos de carga electrónicos

- Pruebas de baterías y sistemas de almacenamiento energético: Analizan la capacidad, durabilidad y eficiencia de baterías bajo ciclos de carga y descarga controlados.
- Validación de sistemas de respaldo (UPS): Verifican el desempeño de fuentes de alimentación ininterrumpida (UPS) en condiciones de carga dinámica, simulando interrupciones y fluctuaciones en el suministro de energía.
- Evaluación de fuentes de alimentación y convertidores: Ensayan la estabilidad y eficiencia de convertidores de energía y fuentes de alimentación reguladas.
- Desarrollo de dispositivos electrónicos avanzados: Validan inversores, rectificadores y otros equipos electrónicos utilizados en sistemas de energía renovable y redes inteligentes.
- Investigación y desarrollo en energías renovables: Simulan cargas dinámicas en sistemas fotovoltaicos y eólicos, garantizando que los dispositivos puedan manejar las fluctuaciones de energía generada.

Ventajas de los Bancos de carga electrónicos

Las ventajas de los bancos de carga electrónicos radican en su alta precisión y control, lo que permite ajustar las condiciones de prueba con gran exactitud, siendo ideales para dispositivos electrónicos sensibles y pruebas complejas. Además, ofrecen una flexibilidad de configuración que les permite emular diversos tipos de cargas, desde resistivas hasta dinámicas y mixtas, todo en un solo dispositivo. Estos bancos también destacan por su capacidad de análisis en tiempo real, proporcionando datos en vivo que facilitan un análisis

detallado del desempeño del equipo bajo prueba. Su versatilidad los convierte en herramientas esenciales para el diseño y validación de tecnologías avanzadas, como sistemas de energía renovable e infraestructura de redes inteligentes. Asimismo, su capacidad para emular diferentes tipos de cargas los posiciona como una solución integral que puede sustituir múltiples dispositivos de prueba, optimizando recursos y mejorando la eficiencia del proceso de evaluación.



Figura 11. Banco de carga electrónico de alta precisión (1800W-2400W).

Fuente: KWK Resistors. (n.d.). *Electronic Load Banks*. Recuperado de <https://www.kwk-resistors.in/electronic-load-banks/>

1.2. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir un banco de carga resistivo para el motor ciclo Otto Kubota DG972-E2

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diseño de la estructura y los sistemas eléctrico y de enfriamiento del banco de carga resistivo
- Construcción de la estructura y los sistemas eléctrico y de enfriamiento del banco de carga resistivo
- Validación del funcionamiento del banco de carga resistivo

CAPITULO 2. Marco teórico

El diseño y la construcción de un banco de carga resistivo para el motor Kubota DG972-E2 requieren una base teórica sólida que respalde las decisiones técnicas implicadas en su desarrollo. En este capítulo se presentan los fundamentos conceptuales y técnicos necesarios para garantizar que el diseño del banco satisfaga los requisitos específicos del motor y sus aplicaciones prácticas.

El marco teórico profundiza en los principios de operación de los bancos de carga resistivos, describiendo en detalle sus componentes principales, su funcionamiento y los parámetros clave para su diseño. Además, se abordan aspectos relacionados con la interacción entre el banco de carga y el motor Kubota DG972-E2, destacando cómo las pruebas realizadas permitirán evaluar su desempeño en condiciones controladas.

Este capítulo proporciona la base técnica indispensable para orientar la construcción del banco de carga resistivo, asegurando que cumpla con los objetivos establecidos y se adapte de manera eficiente a las necesidades específicas del motor y sus aplicaciones prácticas

2.1. Bancos de carga resistivos

2.1.1. Definición y principio de funcionamiento

Un banco de carga resistivo es un dispositivo diseñado para simular una carga eléctrica puramente resistiva, como la generada por dispositivos como bombillas incandescentes o calentadores eléctricos. Su función principal es disipar la energía eléctrica proveniente de una fuente de alimentación, como un generador, motor o sistema de energía, transformándola en calor. Esto permite realizar pruebas controladas para evaluar el rendimiento, estabilidad y eficiencia del sistema bajo diferentes condiciones de carga.

El principio de funcionamiento del banco de carga resistivo se basa en la conversión de energía eléctrica en energía térmica a través de resistencias. Estas resistencias, fabricadas generalmente con aleaciones de níquel-cromo debido a su alta conductividad térmica y eléctrica, generan calor por efecto Joule cuando son atravesadas por una corriente eléctrica.

Al conectar una fuente de alimentación, la energía eléctrica fluye hacia las resistencias, donde es disipada en forma de calor. Este proceso permite analizar el comportamiento del sistema frente a distintos niveles de carga sin necesidad de almacenar la energía generada.

Para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente durante las pruebas, los bancos de carga resistivos incorporan sistemas de enfriamiento, como ventiladores o disipadores de calor, que evitan el sobrecalentamiento de las resistencias y aseguran su operación dentro de parámetros seguros.

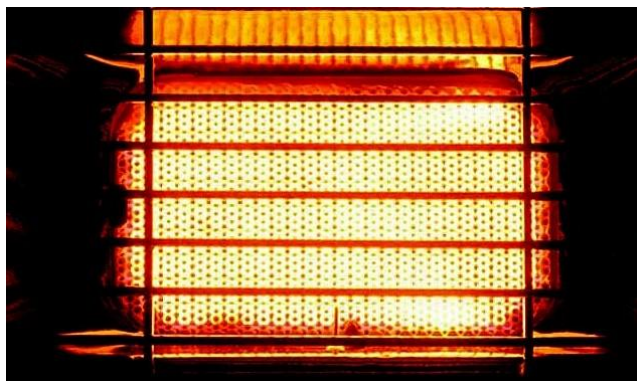


Figura 12. Representación del efecto Joule y sus aplicaciones como la calefacción.

Fuente: Iturbe, M. (n.d.). *¿Qué es el Efecto Joule? Aplicaciones para calefacción*. Recuperado de <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/que-es-el-efecto-joule-aplicaciones-para-calefaccion.html>

2.1.2. Componentes principales

Un banco de carga resistivo está compuesto por varios elementos fundamentales que trabajan juntos para simular una carga resistiva, disipar energía en forma de calor y medir parámetros operativos durante las pruebas. A continuación, se describen los componentes principales:

2.1.2.1 Resistencias

Las resistencias son el componente principal de un banco de carga resistivo, ya que son las encargadas de convertir la energía eléctrica en calor mediante el efecto Joule. Su diseño y selección son críticos para garantizar que el banco funcione de manera eficiente, segura y dentro de las especificaciones técnicas necesarias para las pruebas.

El efecto Joule describe cómo la corriente eléctrica que fluye a través de una resistencia genera calor. La cantidad de calor producido se calcula con la ecuación N°1 :

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad \text{ecuación N°1}$$

Ecuación N°1. Efecto Joule.

donde:

- Q es la energía térmica [J].
- I es la corriente eléctrica [A].
- R es la resistencia eléctrica [Ω].
- T es el tiempo [s].

En un banco de carga resistivo, el calor generado por las resistencias se disipa de manera controlada, lo que permite simular condiciones de carga realistas y proteger el sistema de posibles daños por sobrecalentamiento. La capacidad de las resistencias para soportar altas temperaturas y corrientes continuas sin degradarse es fundamental para garantizar la eficiencia y durabilidad del banco de carga.

Entre los materiales más utilizados para la fabricación de resistencias en estos dispositivos se encuentran:

- **Aleaciones de níquel-Cromo (NiCr):** Altamente resistentes a la oxidación y corrosión a altas temperaturas. Tienen una buena conductividad térmica y eléctrica. Además de contar con una amplia tolerancia al calor, lo que las hace ideales para cargas altas y pruebas prolongadas.
- **Acero inoxidable:** Utilizado en aplicaciones donde se requiere durabilidad y resistencia a la corrosión. Tienen una menor conductividad térmica que las aleaciones de níquel-cromo.
- **Cerámica refractaria:** A veces se usa como soporte para mejorar la disipación de calor.

Tipos de resistencias

Existen diferentes tipos de resistencias utilizadas en bancos de carga resistivos, dependiendo de las necesidades del sistema:

- **Resistencias de alambre enrollado:** se fabrican utilizando alambre de aleación de níquel-cromo (NiCr), el cual se enrolla alrededor de un núcleo cerámico. Este diseño

proporciona una alta resistencia al calor, lo que las hace ideales para aplicaciones que operan bajo condiciones de alta temperatura. Además, estas resistencias son fáciles de ajustar en configuraciones específicas, lo que les otorga versatilidad y adaptabilidad en una amplia variedad de sistemas eléctricos.



Figura 13. Resistencia de alambre bobinado Danotherm modelo HS50.

Fuente: Unicrom. (n.d.). *Resistencias de alambre bobinado*. Recuperado de <https://unicrom.com/resistencias-de-alambre-bobinado/>

- **Resistencias de chapa perforada:** están compuestas por láminas metálicas con perforaciones que generan resistencia al flujo de corriente eléctrica. Este diseño permite una disipación uniforme del calor, lo que asegura un funcionamiento eficiente. Además, su estructura facilita el enfriamiento, convirtiéndolas en una opción práctica y efectiva para aplicaciones que requieren una gestión térmica confiable.
- **Resistencias tubulares:** Son resistencias encapsuladas en un tubo metálico, ideales para aplicaciones donde se requiere una disipación eficiente.
- **Resistencias de película o película Gruesa:** Utilizadas en aplicaciones de baja potencia, ya que son compactas pero limitadas en capacidad de disipación de calor.
- **Resistencias de cuarzo:** están diseñadas con un alambre resistivo encapsulado dentro de un tubo de cuarzo. Esta configuración proporciona aislamiento eléctrico, lo que mejora la seguridad durante su operación. Además, estas resistencias destacan por su capacidad para disipar el calor de manera uniforme, asegurando un rendimiento eficiente, y ofrecen una protección adicional frente a condiciones ambientales adversas o sobrecalentamiento.



Figura 14. Resistencias de cuarzo utilizadas en aplicaciones industriales

Fuente: Resistencias Industriales Cessa. (n.d.). *Resistencias de cuarzo*. Recuperado de <https://resistenciasindustrialescessa.com/producto/resistencias-de-cuarzo/>

Configuración:

La disposición de las resistencias en un banco de carga resistivo es fundamental para ajustar la carga eléctrica y optimizar las pruebas de rendimiento. Existen configuraciones básicas y combinadas que se utilizan según los requerimientos del sistema a evaluar. Estas configuraciones permiten manejar diferentes niveles de corriente y voltaje, adaptando la resistencia total del banco.

I. Configuración en serie

En esta configuración, las resistencias se conectan una después de la otra, de manera que la corriente pasa secuencialmente a través de todas ellas. La resistencia total (R_T) en una conexión en serie se calcula como la suma de las resistencias individuales y su ecuación es la siguiente:

$$R_T = \sum_{1}^n R_n \quad \text{ecuación N°2}$$

Ecuación N°2. Ecuación para el cálculo de la Resistencia total o equivalente para una configuración en serie

Las características principales de este tipo de configuración son:

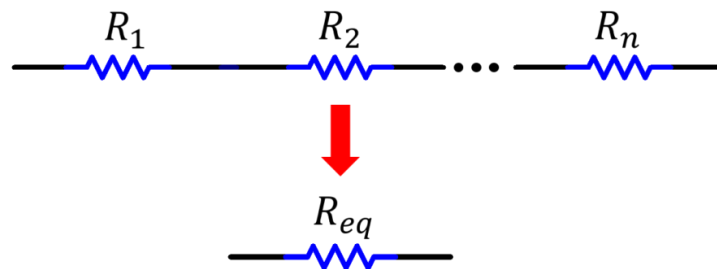
- Aumenta el valor total de la resistencia
- Mantiene constante la corriente que fluye por cada resistencia

- Adecuada para sistemas que operan a bajos niveles de corriente o donde se necesita una mayor resistencia total.

Por otro lado, las ventajas con las que cuenta esta configuración son:

- Fácil de implementar en sistemas donde se requiere incrementar la resistencia.
- Proporciona una caída de voltaje uniforme en cada resistencia, útil para pruebas específicas.

Pero también cuenta con limitaciones como que no es eficiente para manejar altas corrientes, ya que cada resistencia soporta la misma corriente.



$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$$

Figura 15. Representación de resistencias conectadas en serie.

Fuente: Microchip Otle. (n.d.). *Resistencias en serie y paralelo: Fórmulas y ejemplos*. Recuperado de <https://microchipotle.com/resistencias-en-serie-y-paralelo-formulas-y-ejemplos/>

II. Configuración en paralelo

En esta configuración, todas las resistencias están conectadas entre los mismos puntos de voltaje, de modo que la corriente se divide entre ellas. La resistencia total (R_T) se calcula con la ecuación N°3:

$$\frac{1}{R_T} = \sum_{1}^n \frac{1}{R_n} \quad \text{ecuación N°3}$$

Ecuación N°3. Ecuación para el cálculo de la Resistencia total o equivalente para una configuración en paralelo

Las características principales de este tipo de configuración son:

- Disminuye el valor total de la resistencia.
- El voltaje en cada resistencia es el mismo, pero la corriente se divide proporcionalmente entre ellas.

Por otro lado, las ventajas con las que cuenta esta configuración son:

- Permite manejar corrientes más altas, ya que la carga se distribuye entre las resistencias.
- Útil en sistemas de alto consumo donde se necesita mantener una resistencia baja.

Pero también cuenta con limitaciones como que Incrementa la complejidad del diseño al requerir más conexiones para equilibrar la corriente entre las resistencias.

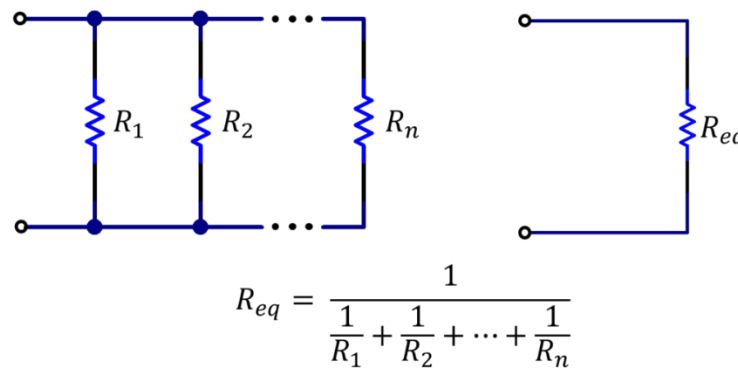


Figura 16. Representación de resistencias conectadas en paralelo.

Fuente: Microchip Otle. (n.d.). *Resistencias en serie y paralelo: Fórmulas y ejemplos*. Recuperado de <https://microchipotle.com/resistencias-en-serie-y-paralelo-formulas-y-ejemplos/>

III. Configuración combinada (serie y paralelo)

En esta configuración, se combinan resistencias conectadas en serie y en paralelo para obtener un valor de resistencia ajustable y adaptarse a diferentes condiciones de carga.

Las características principales de este tipo de configuración son:

- La resistencia total depende de la combinación de los valores en serie y paralelo.
- Permite ajustar tanto la corriente como el voltaje del sistema.

Por otro lado, las ventajas con las que cuenta esta configuración son:

- Gran flexibilidad para personalizar la carga resistiva según las necesidades de la prueba.

- Distribuye de manera eficiente la corriente y el calor generado.

Su principal limitación es que esta es más compleja de diseñar e implementar, pero compensa con su versatilidad.

2.1.2.2 Sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento es un componente esencial en un banco de carga resistivo, ya que permite disipar el calor generado por las resistencias y mantener el sistema dentro de los límites térmicos seguros. Sin un enfriamiento adecuado, el calor acumulado podría comprometer el funcionamiento de las resistencias, reducir su vida útil e incluso poner en riesgo la seguridad del banco de carga. Los Objetivos del Sistema de Enfriamiento son:

- **Disipación de calor:** Eliminar el exceso de calor generado por las resistencias para garantizar la estabilidad del sistema.
- **Seguridad operativa:** Proteger las resistencias y los componentes eléctricos de sobrecalentamientos que podrían provocar fallos.
- **Optimización del rendimiento:** Mantener las resistencias en un rango de temperatura ideal, lo que asegura mediciones confiables y prolonga la vida útil del banco de carga.

Tipos de sistemas de enfriamiento

Existen diferentes tipos de sistemas de enfriamiento, cada uno diseñado para adaptarse a las necesidades de potencia, duración de las pruebas y eficiencia térmica requerida. A continuación, se describen los sistemas más comunes, desde los enfoques pasivos hasta los activos, destacando sus características, ventajas y aplicaciones. Entre ellos están:

- **Enfriamiento pasivo:** se basa en el uso de radiadores o disipadores de calor para transferir la energía térmica generada al ambiente de forma natural, sin la necesidad de sistemas mecánicos adicionales. Este método es adecuado para bancos de carga de baja potencia, ya que ofrece una solución simple y económica. Sin embargo, su capacidad de disipación es limitada, lo que puede restringir su aplicación en sistemas que requieren manejar mayores niveles de calor

- **Enfriamiento activo por aire (ventilación forzada mediante convección):** también conocido como ventilación forzada mediante convección, utiliza ventiladores para impulsar el flujo de aire alrededor de las resistencias. Este mecanismo incrementa de manera significativa la eficiencia en la disipación térmica, permitiendo manejar mayores niveles de calor de forma controlada. Este tipo de sistema de enfriamiento es ampliamente utilizado en bancos de carga de media y alta potencia, donde se requiere una gestión térmica más eficiente para garantizar el rendimiento y la seguridad del equipo.
- **Enfriamiento activo por líquido (refrigeración líquida):** emplea un líquido refrigerante que circula a través de intercambiadores de calor para absorber y disipar el calor generado por las resistencias. Este sistema es especialmente adecuado para bancos de carga de alta potencia, ya que ofrece una capacidad de disipación térmica superior en comparación con otros métodos. Sin embargo, su implementación implica un mayor costo y complejidad, lo que limita su uso a aplicaciones donde el manejo de altas cargas térmicas es crítico.

En este proyecto, el banco de carga resistivo diseñado para el motor Kubota DG972-E2 utilizará un sistema de enfriamiento basado en convección forzada por aire, específicamente mediante ventilación forzada en bancos de tubos. Este enfoque combina la eficiencia de la ventilación activa con un diseño que maximiza la transferencia de calor entre las resistencias y el flujo de aire.

El sistema de enfriamiento por convección forzada en bancos de tubos se fundamenta en el movimiento controlado de aire a través de un conjunto de resistencias encapsuladas en tubos, como las resistencias de cuarzo. El flujo de aire, generado por ventiladores, incrementa la transferencia de calor desde la superficie de las resistencias hacia el ambiente, permitiendo una disipación eficiente del calor producido por el efecto Joule.

Este sistema se basa en el principio físico de aumento del coeficiente de transferencia de calor (h) mediante la interacción forzada entre el aire y las superficies calientes. A diferencia de la convección natural, en la cual el movimiento del fluido es impulsado por diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura, en la convección forzada el flujo de aire es generado por un mecanismo externo, lo que incrementa la velocidad del fluido y

mejora significativamente la transferencia de calor. Este proceso está respaldado por la teoría de la transferencia de calor por convección forzada, siendo influido por parámetros como el número de Reynolds (Re) y el número de Nusselt (Nu).

Las ventajas con las que cuenta el sistema de convección forzada en bancos de tubos:

- **Eficiencia térmica:** Permite disipar grandes cantidades de calor de manera uniforme y controlada.
- **Compatibilidad con altas potencias:** Ideal para pruebas como las realizadas en el motor Kubota DG972-E2.
- **Durabilidad:** Mantiene las resistencias en su rango térmico seguro, prolongando su vida útil.
- **Flexibilidad de diseño:** Facilita ajustes modulares para adaptarse a diferentes configuraciones de carga.

La eficiencia de la convección forzada está determinada por la disposición geométrica de los tubos (resistencias) y el patrón de flujo de aire que los atraviesa. Estas variables afectan directamente la generación de turbulencia, el contacto entre el fluido y las superficies calientes, y, como resultado, la efectividad del proceso de transferencia de calor.

▪ Disposición alineada

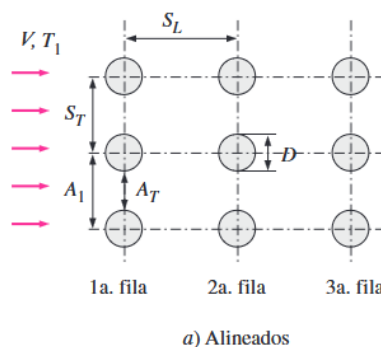


Figura 17. Configuración alineada de los tubos en los bancos

Fuente: Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones prácticas* (4ta ed.). McGraw-Hill Education.

En esta configuración, los tubos están organizados en filas alineadas de forma paralela al flujo de aire, lo que presenta varias características y limitaciones importantes. Entre sus

principales ventajas se encuentra la tendencia a generar un flujo de aire más uniforme, con interrupciones mínimas y menor turbulencia. Esta disposición también reduce la resistencia al flujo, lo que a su vez disminuye el consumo de energía requerido por los ventiladores.

Sin embargo, esta configuración tiene como principal limitación una menor eficiencia en la transferencia de calor, ya que la falta de turbulencia significativa en el flujo dificulta el intercambio térmico óptimo entre el aire y las superficies calientes.

▪ Disposición escalonada

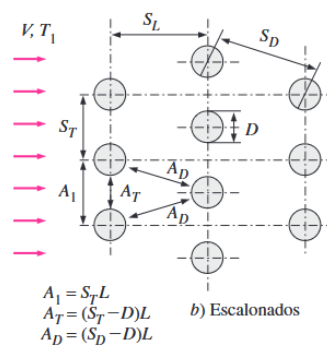


Figura 18. Configuración escalonada de los tubos en los bancos

Fuente: Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones prácticas* (4ta ed.). McGraw-Hill Education.

En esta configuración, las filas de tubos están dispuestas de manera escalonada, lo que introduce importantes características y consideraciones. Una de sus principales ventajas es el aumento significativo de la turbulencia en el flujo de aire debido a las interrupciones en el flujo laminar. Esta turbulencia mejora la transferencia de calor al maximizar el contacto entre el aire y la superficie de los tubos, resultando en un coeficiente de transferencia de calor (h) más elevado. Esta configuración es especialmente adecuada para sistemas que requieren disipar grandes cantidades de calor de manera eficiente.

No obstante, esta disposición también presenta limitaciones. La mayor turbulencia generada produce una resistencia adicional al flujo de aire, lo que puede incrementar el consumo de energía del sistema, especialmente en aplicaciones que demandan un flujo constante y de alta velocidad.

Influencia del espaciamiento entre tubos (resistencias)

El espaciamiento entre los tubos en un banco de tubos es un factor crucial que afecta tanto la transferencia de calor como la resistencia al flujo del aire. Un diseño adecuado debe equilibrar la eficiencia térmica y la facilidad de flujo para optimizar el rendimiento del sistema de enfriamiento.

I. Espaciamiento longitudinal (S_L)

El espaciamiento longitudinal es la distancia entre los centros de los tubos en la dirección del flujo de aire.

Efectos de un espaciamiento longitudinal reducido:

- Incrementa la densidad de tubos en un área específica, lo que aumenta la capacidad de disipación de calor.
- Puede restringir el flujo de aire, generando mayores pérdidas de presión y requiriendo ventiladores más potentes.
- El aire caliente puede recircular entre tubos consecutivos, disminuyendo la eficiencia térmica.

Efectos de un espaciamiento longitudinal amplio:

- Facilita el flujo de aire y reduce las pérdidas de presión.
- Disminuye el contacto del aire con las superficies calientes, reduciendo la eficiencia en la transferencia de calor por unidad de área.

II. Espaciamiento transversal (S_T)

El espaciamiento transversal es la distancia entre los centros de los tubos en la dirección perpendicular al flujo.

Efectos de un espaciamiento transversal reducido:

- Incrementa la interferencia del flujo de aire entre los tubos, lo que genera turbulencia y mejora el coeficiente de transferencia de calor (h).

- Puede provocar obstrucciones en el flujo y mayores caídas de presión en sistemas con altas velocidades de aire.

Efectos de un espaciado transversal amplio:

- Facilita el paso del aire y reduce la resistencia al flujo.
- Disminuye la capacidad del sistema para generar turbulencia, lo que reduce el h y, por ende, la transferencia de calor.

III. Espaciado diagonal (S_D)

En configuraciones escalonadas, el espaciado diagonal (S_D) es la distancia entre los centros de los tubos en un plano diagonal. Es una combinación de S_L y S_T , como se muestra en la ecuación N°4 :

$$S_D = \sqrt{S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2}\right)^2} \quad \text{ecuación N°4}$$

Ecuación N°4. Ecuación para el cálculo del Espaciado Diagonal

Efectos del espaciado diagonal reducido:

- Incrementa la densidad de tubos y mejora la capacidad de disipación de calor.
- Genera mayor turbulencia y pérdida de presión debido al choque continuo del flujo contra las superficies de los tubos.

Efectos del espaciado diagonal amplio:

- Facilita el flujo del aire con menores pérdidas de presión.
- Reduce la interacción turbulenta entre las superficies de los tubos, disminuyendo la transferencia de calor.

IV. Relación S_T/D

El coeficiente S_T / D (espaciado transversal dividido por el diámetro del tubo o Resistencia) es un parámetro clave para caracterizar la eficiencia de un banco de tubos. Valores típicos:

- $S_T/D < 2$: Genera alta densidad de tubos, mayor turbulencia y transferencia de calor, pero con mayor caída de presión.
- $S_T/D > 2$: Facilita el flujo con menor pérdida de presión, pero reduce la transferencia de calor.

El espaciamiento entre tubos no solo afecta la distribución del flujo y la generación de turbulencia, sino también la relación de áreas dentro del banco de tubos. Esta relación determina cómo el flujo se concentra al pasar entre los tubos, afectando directamente la velocidad máxima (V_{max}) y el comportamiento térmico del sistema.

V. Definición de áreas

Área frontal (A_1)

Representa el área total proyectada perpendicular al flujo antes de entrar al banco y se representa por la ecuación N°5:

$$A_1 = S_T \cdot L \quad \text{ecuación N°5}$$

Ecuación N°5. Ecuación para el cálculo del Área Frontal A_1

donde:

- S_T : Paso transversal entre los centros de los tubos [m].
- L : Longitud de los tubos [m].

Área mínima de flujo (A_T)

Es el área más restringida que el flujo atraviesa al pasar entre los tubos y es representada por la ecuación N°6:

$$A_T = (S_T - D) \cdot L \quad \text{ecuación N°6}$$

Ecuación N°6. Ecuación para el cálculo del Área Mínima de Flujo (A_T)

donde:

- D : Diámetro exterior de los tubos [m].
- S_T : Paso transversal entre los centros de los tubos [m].

- L: Longitud de los tubos [m].

Relación de áreas (A_T / A_1)

La relación de áreas es un parámetro crítico que depende directamente de la disposición geométrica de los tubos. Ya sea una configuración alineada o escalonada, esta relación influye en cómo el flujo de aire se comprime y redistribuye al pasar a través del banco.

Relación de áreas para configuración alineada

En una configuración alineada, el flujo se organiza en líneas paralelas a través de los tubos. El área mínima de flujo (A_T) se encuentra únicamente entre los tubos en una fila transversal. La relación de áreas es:

$$\frac{A_T}{A_1} = \frac{S_T - D}{S_T} \quad \text{ecuación N°7}$$

Ecuación N°7. Relación de Áreas para Configuración Alineada

La relación A_T / A_1 se mantiene constante en toda la sección transversal del banco de tubos en configuraciones alineadas, mientras que en configuraciones escalonadas puede variar dependiendo de las áreas mínima y diagonal. Una relación más alta (A_T / A_1 cercana a 1) indica menor compresión del flujo, lo que resulta en menores pérdidas de presión, pero también reduce la velocidad máxima ($V_{\max}$) y la transferencia de calor. Por el contrario, una relación más baja (A_T / A_1 significativamente menor que 1) genera un flujo más comprimido, aumentando $V_{\max}$ y mejorando la transferencia de calor, aunque a costa de mayores pérdidas de presión en el sistema.

Relación de áreas para configuración escalonada

En configuraciones escalonadas, la relación de áreas compara el área mínima disponible para el flujo con el área frontal del banco (A_1):

- **Área frontal (A_1):**

$$A_1 = S_T \cdot L \quad \text{ecuación N°5}$$

Ecuación N°5. Ecuación para el cálculo del Área Frontal A_1

- **Área mínima (A_T):**

$$A_T = \min((S_T - D) \cdot L, (S_D - D) \cdot L) \quad \text{ecuación N°8}$$

Ecuación N°8. Ecuación para el cálculo del Área Mínima de Flujo para Configuración Escalonada

- **Relación de Áreas:** La relación de áreas para configuraciones escalonadas se define como:

$$\frac{A_T}{A_1} = \frac{\min(S_T - D, S_D - D)}{S_T} \quad \text{ecuación N°9}$$

Ecuación N°9. Relación de Áreas para Configuración Escalonada

En la configuración escalonada, la relación de áreas (A_T / A_1) es más variable que en la alineada, ya que depende tanto del paso transversal (S_T) como del paso diagonal (S_D). Esta variabilidad permite que el flujo se redistribuya de manera más efectiva, generando mayor compresión en las áreas mínimas de flujo. Una relación más baja de A_T / A_1 en esta configuración incrementa la velocidad máxima ($V_{\max}$) dentro del banco, lo que mejora la transferencia de calor al fomentar la turbulencia, pero también aumenta las pérdidas de presión. Esta disposición es ideal para aplicaciones que requieren alta eficiencia térmica, aunque exige un diseño cuidadoso para balancear las mayores demandas de ventilación debido al incremento en la resistencia al flujo.

VI. Cálculo de la Velocidad Máxima ($V_{\max}$) en Bancos de Tubos

Tras comprender cómo la relación de áreas (A_T / A_1) define la distribución del flujo en un banco de tubos, es fundamental analizar cómo esta geometría afecta la velocidad del fluido dentro del banco. La compresión del flujo en las áreas mínimas genera una aceleración que alcanza su punto máximo en estas zonas restringidas, conocido como la velocidad máxima ($V_{\max}$). Este parámetro es crucial, ya que influye directamente en la transferencia de calor, el régimen de flujo, y las pérdidas de presión.

El cálculo de $V_{\max}$ varía según la configuración del banco (alineada o escalonada) y la región predominante para el paso del flujo, ya sea el área mínima transversal (A_T) o el área diagonal (A_D). A continuación, se detallan las fórmulas utilizadas para determinar $V_{\max}$ en cada caso,

destacando las diferencias entre configuraciones y su impacto en el comportamiento térmico del sistema..

Configuración alineada

En esta configuración, el flujo se comprime únicamente a través de las áreas mínimas transversales (A_T) entre los tubos. La velocidad máxima se calcula usando la relación:

$$V_{\max} = \frac{S_T}{S_T - D} \cdot V \quad \text{ecuación N°10}$$

Ecuación N°10. Ecuación para el cálculo de la Velocidad máxima en una Configuración Alineada

Donde:

- $V_{\max}$: Velocidad máxima en el área mínima transversal (A_T) [m/s].
- S_T : Paso transversal entre los centros de los tubos[m].
- D : Diámetro exterior de los tubos.[m]
- V : Velocidad de aproximación antes de entrar al banco o a la salida del ventilador.[m/s]

Configuración escalonada

En configuraciones escalonadas, el flujo puede desplazarse diagonalmente a través del área mínima diagonal (A_D), dependiendo de la proximidad entre los tubos. La velocidad máxima puede calcularse de dos maneras:

Si $2 A_D > A_T$ (flujo predominante en el área mínima transversal): La fórmula es la misma que para la configuración alineada:

$$V_{\max} = \frac{S_T}{S_T - D} \cdot V \quad \text{ecuación N°10}$$

Ecuación N°10. Ecuación para el cálculo de la Velocidad máxima en una Configuración Escalonada si $2 A_D > A_T$

Si $2 A_D \leq A_T$ (flujo predominante en el área diagonal): Se utiliza el paso diagonal (S_D):

$$V_{\max} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} \cdot V \quad \text{ecuación N°11}$$

Ecuación N°11. Ecuación para el cálculo de la Velocidad máxima en una Configuración Escalonada si $2 A_D \leq A_T$

VII. Parámetros físicos del fluido

El comportamiento del flujo de aire en el banco de tubos está influenciado por sus propiedades físicas, las cuales varían dependiendo de las condiciones de operación, como la temperatura y la presión. Antes de calcular el número de Reynolds (Re_D) y otros parámetros relacionados, es esencial definir y comprender las principales propiedades del fluido que intervienen en estos cálculos

Densidad (ρ)

La densidad del aire mide su masa por unidad de volumen, expresada en unidades de kg/m^3 , es una propiedad fundamental que describe la masa del aire por unidad de volumen. Este parámetro tiene una influencia directa en la fuerza inercial del fluido, ya que afecta la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas que definen el número de Reynolds (Re_D). Una densidad mayor implica un flujo con mayor inercia, lo que puede incrementar la turbulencia y, por ende, mejorar la transferencia de calor. Sin embargo, también contribuye a mayores pérdidas de presión, ya que un flujo más denso requiere más energía para ser impulsado a través del sistema. Por esta razón, conocer la densidad del aire es esencial para dimensionar correctamente el sistema de enfriamiento y optimizar su desempeño. Se expresa de la siguiente forma:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{ecuación N°12}$$

Ecuación N°12. Ecuación para el cálculo de la densidad

donde:

- ρ : Representa la densidad, que se define como la cantidad de masa por unidad de volumen. [kg/m^3]
- m : Representa la masa del objeto o sustancia. [kg]
- V : Representa el volumen que ocupa la masa. [m^3]

Viscosidad dinámica (μ)

La viscosidad dinámica (μ) mide la resistencia del fluido al movimiento debido a las fuerzas internas de fricción. Se expresa en unidades de $Pa \cdot s$ o $N \cdot s/m^2$ y es un parámetro clave para calcular la fuerza viscosa que influye directamente en el número de Reynolds (Re_D). En

el caso de los gases, la viscosidad varía con la temperatura, aumentando conforme esta se eleva. Esto puede ser estimado mediante correlaciones experimentales, como la ecuación de Sutherland, que ajusta la viscosidad en función de la temperatura del sistema, permitiendo un análisis más preciso del comportamiento del fluido en condiciones reales de operación. Matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad \text{ecuación N°13}$$

Ecuación N°13. Ecuación para el cálculo del esfuerzo cortante

donde:

- τ : Representa el esfuerzo cortante (shear stress). Es la fuerza por unidad de área que actúa paralela a la superficie. [N/m²]
- μ : Representa la viscosidad dinámica del fluido. Es una medida de la resistencia interna del fluido al flujo. [N·s/m²]
- du/dy : Es el gradiente de velocidad o tasa de deformación del fluido. Representa el cambio de la velocidad (u) respecto a la distancia (y) perpendicular a la dirección del flujo. [s⁻¹]

Calor específico (cp)

El calor específico (cp) es una propiedad que mide la cantidad de energía que un fluido necesita para elevar su temperatura por unidad de masa. En el caso del aire, este valor es aproximadamente constante dentro del rango de temperaturas típicas de operación, lo que facilita su uso en sistemas de transferencia de calor. El calor específico es fundamental para determinar la capacidad del aire como medio de transporte de energía térmica, siendo clave en el diseño de sistemas de enfriamiento y en la optimización de la eficiencia térmica del banco de carga resistivo. Matemáticamente se expresa de la siguiente manera en la ecuación N°14:

$$c_p = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T} \quad \text{ecuación N°14}$$

Ecuación N°14. Ecuación para el cálculo del Calor Específico

Sus unidades son J/kg·K y donde:

- c_p : Representa el calor específico a presión constante. Es la cantidad de calor necesaria para aumentar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en un grado a presión constante. [J/kg·K]
- ΔQ : Es el calor transferido al sistema. Representa la energía térmica suministrada o absorbida. [J]
- ΔT : Es el cambio de temperatura que experimenta la sustancia. Se calcula como $T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}}$. [K] o [°C]
- m : Es la cantidad de materia del sistema. [kg]

Conductividad térmica (k)

La conductividad térmica (k) es una propiedad que mide la capacidad del aire para transferir calor por conducción. Es un parámetro esencial en la transferencia de calor, ya que influye en el cálculo del coeficiente de transferencia térmica y del número de Nusselt. En aplicaciones como el banco de carga resistivo, la conductividad térmica del aire, aunque relativamente baja en comparación con líquidos o sólidos, juega un papel crucial en la eficiencia del enfriamiento al determinar cuánto calor puede disiparse hacia el flujo de aire. Sus Unidades son W/m·K. y matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$q = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad \text{ecuación N°15}$$

Ecuación N°15. Ecuación para el cálculo del Conductividad Térmica

donde:

- q : Representa la densidad de flujo de calor (heat flux), es decir, la cantidad de energía térmica que pasa por unidad de área y por unidad de tiempo. [W/m²]
- k : Es la conductividad térmica del material. Describe la capacidad del material para conducir calor. [W/m]
- dT/dx : Representa el gradiente de temperatura. Es el cambio de la temperatura (T) respecto a la distancia (x) en la dirección del flujo de calor. [K/m] o [°C/m]
- El signo negativo (-): Indica que el flujo de calor se produce en la dirección de disminución de la temperatura, es decir, el calor fluye de las regiones más calientes hacia las más frías.

Número de Prandtl (Pr)

El número de Prandtl (Pr) es un parámetro adimensional que describe la relación entre la difusión de momento y la difusión de energía térmica en un fluido. Este número es clave para determinar cómo se transfiere el calor dentro del flujo y afecta directamente los cálculos del número de Nusselt y el coeficiente de transferencia de calor, siendo esencial en el análisis y diseño de sistemas de enfriamiento y transferencia térmica.

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad \text{ecuación N°16}$$

Ecuación N°16. Ecuación para el cálculo del número de Prandtl

donde:

- Pr: Número de Prandtl
- c_p : Calor específico a presión constante [J/kg·K]
- μ : Viscosidad dinámica [N·s/m²]
- k: Conductividad térmica [W/m]

Cálculo del Número de Reynolds

Una vez definida la velocidad máxima del flujo ($V_{\max}$) y los parámetros físicos del fluido, como su densidad, viscosidad, y otras propiedades relacionadas, es posible determinar el número de Reynolds (Re_D), un parámetro adimensional que caracteriza el comportamiento del flujo dentro del banco de tubos. Este cálculo es crucial para identificar si el flujo es laminar o turbulento, ya que esto influye directamente en la transferencia de calor y en las pérdidas de presión del sistema.

El número de Reynolds relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas del fluido, proporcionando una medida de su régimen de flujo. En bancos de tubos, se utiliza la velocidad máxima ($V_{\max}$) para reflejar con precisión las condiciones del flujo en las áreas mínimas, y se define como:

$$Re_D = \frac{\rho \cdot V_{\max} \cdot D}{\mu} \quad \text{ecuación N°17}$$

Ecuación N°17. Ecuación para el cálculo del Número de Reynolds

donde:

- Re_D : Número de Reynolds.
- ρ : Densidad del fluido [kg/m^3].
- V_{max} : Velocidad máxima del flujo [m/s].
- D : Diámetro externo de los tubos [m].
- μ : Viscosidad dinámica del fluido [$Pa \cdot s$].

El número de Reynolds (Re_D) se utiliza para caracterizar el régimen de flujo del aire en el sistema de enfriamiento. Un Re_D bajo ($Re_D < 2300$) indica un flujo laminar, donde el movimiento del aire es ordenado, con menor turbulencia y una transferencia de calor menos eficiente. Por otro lado, un Re_D alto ($Re_D > 2300$) sugiere un flujo turbulento, con mayor mezcla del aire, lo que mejora significativamente la transferencia de calor, pero también incrementa las pérdidas de presión. Este parámetro es clave para garantizar que el flujo sea adecuado para disipar el calor generado por las resistencias del banco de carga y para dimensionar correctamente los componentes del sistema, como los ventiladores.

Cálculo del número de Nusselt (Nu_D)

Una vez calculado el número de Reynolds (Re_D), que caracteriza el régimen de flujo del aire en el banco de tubos, el siguiente paso es determinar el número de Nusselt (Nu_D), un parámetro adimensional clave en el análisis de transferencia de calor. Este número describe la relación entre la transferencia de calor por convección y la transferencia de calor por conducción en el fluido.

El número de Nusselt depende directamente del régimen de flujo descrito por Re_D y de las propiedades térmicas del fluido, representadas por el número de Prandtl (Pr). Su cálculo es fundamental para determinar el coeficiente de transferencia de calor (h), que a su vez permite estimar la eficiencia del sistema de enfriamiento en disipar el calor generado por las resistencias del banco de carga.

Para calcular Nu_D , es importante considerar el número de filas del banco de tubos (N_L), ya que este influye en el desarrollo térmico e hidráulico del flujo.

▪ **Cuando $N_L \geq 16$:**

En bancos con más de 16 filas, el flujo se considera completamente desarrollado térmica e hidráulicamente. En este caso Nu_D se calcula utilizando la correlación estándar:

$$Nu_D = C \cdot Re_D^m \cdot Pr^n \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0.25} \quad \text{ecuación N°18}$$

Ecuación N°18. Ecuación para el cálculo del número de Nusselt

Donde C, m, y n son constantes específicas determinadas experimentalmente y que dependen del régimen de flujo y de la disposición geométrica del banco (alineada o escalonada). Este enfoque es válido debido a que el flujo tiene suficiente recorrido para estabilizarse dentro del banco. Los valores de C, m y n serán dependerán de Re_D , que el número de Prandtl se encuentre entre los siguientes valores $0.7 < Pr < 500$ y también de la configuración geométrica de los tubos (Resistencias), estos se presentarán en la siguiente Tabla:

Configuración	Rango de Re_D	Correlación
Alineados	0-100	$Nu_D = 0.9 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
Alineados	100-1 000	$Nu_D = 0.52 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
Alineados	1 000-2 x 10 ⁵	$Nu_D = 0.27 Re_D^{0.63} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
Alineados	2 x 10 ⁵ -2 x 10 ⁶	$Nu_D = 0.033 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
Escalonados	0-500	$Nu_D = 1.04 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
Escalonados	500-1 000	$Nu_D = 0.71 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
Escalonados	1 000-2 x 10 ⁵	$Nu_D = 0.35 (St/SI)^{0.2} Re_D^{0.6} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
Escalonados	2 x 10 ⁵ -2 x 10 ⁶	$Nu_D = 0.031 (St/SI)^{0.2} Re_D^{0.8} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$

Tabla 1. Correlaciones del número de Nusselt para flujo cruzado sobre bancos de tubos, para $N_L > 16$ y $0.7 < Pr < 500$ (tomado de Zukauskas, 1987)

Fuente: Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones prácticas* (4ta ed.). McGraw-Hill Education

▪ **Cuando $N_L < 16$:**

En bancos con menos de 16 filas, el flujo no alcanza un estado completamente desarrollado, lo que afecta la transferencia de calor. Para estos casos, se aplica un factor de corrección (F) que ajusta Nu_D para reflejar esta condición:

$$Nu_D = F \cdot Nu_{D,N_L \geq 16} \quad \text{ecuación N°19}$$

Ecuación N°19. Ecuación para el cálculo del número de Nusselt cuando $N_L < 16$

- **F:** Factor de corrección, determinado experimentalmente. Depende del número de filas y se encuentra en la siguiente tabla

N_f	Alineados	Escalonados
1	0,7	0,64
2	0,8	0,76
3	0,86	0,84
4	0,9	0,89
5	0,93	0,93
6	0,945	0,945
7	0,96	0,96
10	0,98	0,98
13	0,99	0,99

Tabla 2. Factor de corrección F que debe usarse en Nu_D , $N_L \geq 16 = F \cdot Nu_D$ para $N_L < 16$ y $Re_D > 1\,000$ (tomado de Zukauskas, 1987)

Fuente: Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones prácticas* (4ta ed.). McGraw-Hill Education

- **Nu_D , $N_L \geq 16$:** Valor de Nu_D para un banco con flujo plenamente desarrollado. Estos dos métodos reflejan cómo la geometría y la longitud del banco de tubos afectan la eficiencia de la transferencia de calor.

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor (h)

Una vez calculado el número de Nusselt (Nu_D), que caracteriza la relación entre la transferencia de calor por convección y por conducción en el flujo, el siguiente paso es determinar el coeficiente de transferencia de calor (h). Este coeficiente cuantifica la eficiencia con la que el calor generado por las resistencias del banco de carga es transferido al flujo de aire a través de la superficie de los tubos.

El coeficiente de transferencia de calor (h) es un parámetro clave en el análisis de transferencia térmica por convección. Representa la capacidad del flujo de aire para transportar calor desde una superficie caliente (en este caso, las resistencias del banco de carga) hacia el fluido circundante. Este valor se utiliza para evaluar la eficiencia del sistema de enfriamiento y es crucial para garantizar la disipación adecuada del calor generado por el

banco de carga resistivo. Su cálculo permite evaluar la capacidad del sistema de enfriamiento para disipar el calor generado, asegurando que las resistencias funcionen dentro de un rango térmico seguro, evitando sobrecalentamientos y contribuyendo al desempeño óptimo del sistema

El coeficiente de transferencia de calor está directamente relacionado con el número de Nusselt (Nu_D) a través de la ecuación N°20:

$$h = \frac{Nu_D \cdot k}{D} \quad \text{ecuación N°20}$$

Ecuación N°20. Ecuación para el cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor

donde:

- h : Coeficiente de transferencia de calor [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$].
- Nu_D : Número de Nusselt adimensional.
- k : Conductividad térmica del aire [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$].
- D : Diámetro externo del tubo o resistencia [m].

Determinación de temperatura de salida del fluido (T_e)

Antes de determinar la temperatura de salida del fluido (T_e), es necesario calcular dos parámetros fundamentales: el área total de transferencia de calor (A_s) y el flujo másico del fluido ($\dot{m}$). Estos valores están directamente relacionados con la geometría del banco de tubos y las propiedades del aire en el sistema. Su correcta evaluación es esencial para garantizar que el diseño del sistema de enfriamiento permita disipar el calor generado por las resistencias

El área total de transferencia de calor (A_s) representa la superficie disponible para el intercambio de calor entre las resistencias del banco y el flujo de aire. En un banco de tubos, el área se calcula considerando el número total de tubos, su diámetro, y su longitud. La expresión es la siguiente:

$$A_s = N \cdot \pi \cdot D \cdot L \quad \text{ecuación N°21}$$

Ecuación N°21. Ecuación para el cálculo del Área total de transferencia de calor

donde:

- A_s : Área total de transferencia de calor [m²].
- N : Número total de tubos o resistencias.
- D : Diámetro externo de los tubos o resistencias [m].
- L : Longitud de los tubos o resistencias [m].

Por otro lado, El flujo másico del fluido ($\dot{m}$) mide la cantidad de aire que atraviesa el sistema por unidad de tiempo. Este valor se calcula como siguiente ecuación:

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot (N_T \cdot S_T \cdot S_L) \quad \text{ecuación N°22}$$

Ecuación N°22. Ecuación para el cálculo del flujo másico del fluido

donde:

- $\dot{m}$: Flujo másico [kg/s].
- ρ : Densidad del fluido [kg/m³].
- V : Velocidad del aire justo antes de entrar al banco de tubos [m/s].
- N_T : Número de tubos en el plano transversal.
- S_T : Paso transversal entre los tubos [m].
- S_L : Paso longitudinal entre los tubos [m].

Una vez determinado el coeficiente de transferencia de calor (h), el flujo masico del fluido ($\dot{m}$) y el Área total de transferencia de calor (A_s), el siguiente paso es calcular la temperatura de salida del fluido (T_e). Este parámetro es clave para evaluar el desempeño del sistema de enfriamiento, ya que permite conocer cómo varía la temperatura del flujo de aire al pasar por las resistencias del banco de carga.

La temperatura de salida del fluido se obtiene utilizando una relación que considera el intercambio de calor entre la superficie de las resistencias y el aire. La ecuación utilizada para su cálculo es:

$$T_e = T_s - (T_s - T_i) \cdot \exp\left(-\frac{A_s \cdot h}{\dot{m} \cdot c_p}\right) \quad \text{ecuación N°23}$$

Ecuación N°23. Ecuación para el cálculo de la temperatura de salida del fluido

donde:

- T_e : Temperatura de salida del fluido [K o °C].
- T_s : Temperatura de la superficie de las resistencias [K o °C].
- T_i : Temperatura de entrada del fluido [K o °C].
- A_s : Área total de transferencia de calor [m²].
- h : Coeficiente de transferencia de calor [W/m²·K].
- $\dot{m}$: Flujo másico del fluido [kg/s].
- c_p : Calor específico del fluido [J/kg·K].

En esta expresión, se incluyen factores como el área total de transferencia de calor (A_s), el coeficiente de transferencia de calor (h), el flujo másico del aire ($\dot{m}$), y su calor específico (c_p). Esto permite evaluar cómo el aire absorbe el calor generado por las resistencias del banco y cómo se distribuye esa energía térmica en el sistema.

Cálculo del delta de temperatura media logarítmica(ΔT_m)

Una vez calculada la temperatura de salida del fluido (T_e), el siguiente paso es determinar el delta de temperatura media logarítmica (ΔT_m), un parámetro clave para evaluar de manera precisa la transferencia de calor en el sistema.

El delta de temperatura media logarítmica se utiliza para calcular el calor total transferido, ya que considera la variación de la diferencia de temperaturas entre la superficie de las resistencias y el fluido a lo largo del banco. Se define mediante la siguiente expresión:

$$\Delta T_m = \frac{(T_s - T_e) - (T_s - T_i)}{\ln \left(\frac{T_s - T_e}{T_s - T_i} \right)} \quad \text{ecuación N°24}$$

Ecuación N°24. Ecuación para el cálculo del Delta de temperatura media logarítmica

donde:

- T_s : Temperatura de la superficie de las resistencias [°C o K].
- T_i : Temperatura de entrada del fluido [°C o K].

- T_e : Temperatura de salida del fluido [$^{\circ}\text{C}$ o K].

Este cálculo es fundamental para garantizar una representación precisa de la transferencia de calor, especialmente en sistemas donde las diferencias de temperatura no son constantes. La determinación de ΔT_m permite integrar de forma efectiva el efecto de los gradientes térmicos en el análisis, asegurando que el diseño del sistema de enfriamiento sea capaz de disipar eficientemente el calor generado por las resistencias.

Cálculo de la transferencia total de calor(Q)

Una vez determinada la temperatura media logarítmica (ΔT_m), el siguiente paso es calcular la transferencia total de calor (Q) en el sistema. Este cálculo permite evaluar si el diseño del banco de carga resistivo es capaz de disipar eficientemente el calor generado por las resistencias.

La transferencia total de calor se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$Q = h \cdot A_s \cdot \Delta T_m \quad \text{ecuación N}^{\circ}25$$

Ecuación N°25. Ecuación para el cálculo de la transferencia total de calor

donde:

- Q: Transferencia total de calor (W).
- h: Coeficiente de transferencia de calor ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$), previamente calculado.
- A_s : Área total de transferencia de calor (m^2), que depende del número de tubos, su diámetro y longitud.
- ΔT_m : Temperatura media logarítmica (K), que representa la diferencia promedio efectiva entre la superficie de las resistencias (T_s) y el aire.

El cálculo de la transferencia total de calor (Q) es fundamental en el diseño y análisis del banco de carga resistivo, ya que tiene un impacto directo en la validación del sistema de enfriamiento y en la seguridad del funcionamiento del banco. Aquí se detalla su importancia clave:

El cálculo de Q permite comparar el calor disipado por el sistema con el calor generado por las resistencias (Q_{generado}):

- Si $Q \geq Q_{\text{generado}}$, el sistema de enfriamiento es eficiente y asegura que las resistencias trabajen dentro de un rango térmico seguro.
- Si $Q < Q_{\text{generado}}$, significa que el diseño del sistema es insuficiente, lo que podría llevar a sobrecalentamientos y fallos operativos.

En resumen, los sistemas de enfriamiento desempeñan un papel fundamental en la disipación del calor generado por las resistencias en un banco de carga resistivo. Cada tipo de sistema ya sea por convección natural o forzada, presenta aplicaciones específicas y características particulares que afectan su eficiencia y diseño.

En este proyecto, se seleccionó un sistema de convección forzada en bancos de tubos, que combina ventilación activa con un diseño optimizado para maximizar la transferencia de calor entre las resistencias y el flujo de aire. Este enfoque garantiza una disipación de calor eficiente, incluso en condiciones de alta potencia térmica, asegurando tanto la seguridad como la funcionalidad del sistema.

2.1.2.3 Dispositivos de medición

Multímetro digital

En el banco de carga resistivo, las mediciones eléctricas son esenciales para monitorear el comportamiento del sistema y validar su funcionamiento. En este caso, se cuenta con un único multímetro digital, el cual integra varias funciones de medición en un solo dispositivo. Esto simplifica la instrumentación y proporciona versatilidad para registrar parámetros eléctricos clave.

Funciones del Multímetro digital

- **Medición de voltaje (V):** es una herramienta clave para verificar el voltaje aplicado a las resistencias en un sistema. Su instalación se realiza mediante la conexión directa con la fuente de alimentación, lo que asegura un monitoreo preciso y constante del voltaje durante la operación del equipo
- **Medición de corriente (I):** es fundamental para determinar la cantidad de corriente que fluye a través de las resistencias en un sistema. Para realizar esta medición, el

dispositivo se instala en serie con el circuito, lo que permite obtener datos precisos sobre el flujo de corriente durante la operación

- Medición de potencia (P): es esencial para calcular la cantidad de potencia consumida por el banco de carga. Esta medición resulta crucial para validar la potencia disipada por las resistencias, asegurando que el sistema opera de acuerdo con los parámetros diseñados y cumple con los requisitos técnicos establecidos.
- Medición de energía (EE): registra el consumo energético total durante las pruebas realizadas en el sistema. Esta medición es especialmente útil para análisis prolongados, ya que permite evaluar el comportamiento energético acumulado del banco de carga y su eficiencia a lo largo del tiempo.

El uso de un multímetro digital en el banco de carga resistivo ofrece múltiples ventajas. Este dispositivo permite realizar todas las mediciones eléctricas necesarias de manera sencilla, al combinar en un solo equipo la capacidad de medir voltaje, corriente, potencia y energía. Su diseño compacto y portátil facilita tanto la instalación como el ajuste durante las pruebas, lo que reduce la complejidad de la instrumentación requerida. Además, su versatilidad lo convierte en una herramienta adecuada para adaptarse a diversas necesidades del proyecto, optimizando el monitoreo eléctrico del sistema.

No obstante, el multímetro digital también presenta ciertas limitaciones. Una de las principales es su incapacidad para medir parámetros térmicos, como la temperatura de las resistencias o del flujo de aire, lo que hace necesaria la integración de sensores adicionales para realizar un análisis térmico completo. Otra limitación es que, al ser un único dispositivo, no permite la medición simultánea de varios parámetros, lo que obliga a planificar cuidadosamente el proceso de medición para asegurar que todos los datos necesarios sean registrados de manera precisa.

2.1.2.4 Estructura soporte

En un banco de carga resistivo, la estructura de soporte es el componente encargado de proporcionar estabilidad y resistencia mecánica al conjunto. Su función principal es sostener de manera segura las resistencias, los dispositivos de enfriamiento y otros componentes,

asegurando que el banco pueda operar bajo condiciones de carga térmica y mecánica sin deformaciones o fallos estructurales. Para su diseño, se deben considerar factores clave como la resistencia mecánica, la rigidez, la resistencia a altas temperaturas y la facilidad de mantenimiento.

- **Resistencia mecánica:** La estructura debe soportar el peso de las resistencias, ventiladores, conductos y otros elementos, además de cualquier carga adicional generada durante la operación.
- **Rigidez:** Es fundamental evitar deformaciones excesivas que puedan afectar la disposición de las resistencias o la circulación del flujo de aire.
- **Resistencia a altas temperaturas:** Dado que las resistencias generan calor, los materiales deben ser capaces de mantener su integridad estructural incluso bajo temperaturas elevadas.
- **Facilidad de mantenimiento:** La estructura debe permitir un acceso sencillo para la instalación, inspección y mantenimiento de las resistencias y los sistemas de enfriamiento.

En el diseño de estructuras de soporte para bancos de carga resistivos, la selección de materiales desempeña un papel fundamental para garantizar la resistencia, durabilidad y estabilidad del sistema. Entre los materiales más utilizados se encuentran el acero al carbono, reconocido por su alta resistencia mecánica y costo accesible; el acero inoxidable, destacado por su capacidad para resistir altas temperaturas y condiciones corrosivas; y el aluminio, una opción más ligera con buena resistencia a la corrosión, aunque limitada para soportar cargas pesadas. La elección del material adecuado depende de las condiciones operativas del sistema, incluidas las temperaturas generadas, las cargas mecánicas y el entorno de trabajo.

En conclusión, la estructura de soporte no solo constituye la base física del banco de carga, sino que también asegura que todos los componentes funcionen de manera eficiente y segura. Un diseño bien planificado, combinado con materiales seleccionados estratégicamente, garantiza la confiabilidad del sistema y el cumplimiento de los objetivos establecidos para su operación.

2.1.2.5 Panel de control

El plano de control en el banco de carga resistivo está diseñado para proporcionar un manejo manual y práctico del sistema, asegurando la supervisión y el control de los parámetros eléctricos durante la operación. Este enfoque permite al operador gestionar directamente las condiciones del banco, activando o desactivando circuitos según las necesidades de la prueba.

El panel de control integra componentes esenciales para garantizar la operación segura y eficiente del banco de carga resistivo. Sus principales características incluyen:

- **Switches de control de resistencias:** El panel cuenta con switches que permiten activar y desactivar grupos específicos de resistencias. Esta funcionalidad ofrece flexibilidad para ajustar la carga aplicada al banco, permitiendo realizar pruebas en diferentes condiciones.
- **Switches de control de ventilador y extractor:** El panel cuenta con switches que permiten activar y desactivar el ventilador al igual que el extractor.
- **Indicadores LED:** Cada switch está acompañado de un LED piloto que se ilumina cuando el circuito correspondiente está activo. Esto facilita al operador identificar rápidamente el estado de cada grupo de resistencias, mejorando la seguridad y el monitoreo del sistema.
- **Switch Automático:** El panel incorpora un switch automático que actúa como el principal dispositivo de conexión y desconexión del banco, garantizando un control centralizado del sistema.
- **Protecciones diferenciales:** Las protecciones diferenciales son fundamentales para garantizar la seguridad eléctrica del sistema. Estas protecciones detectan posibles fugas de corriente y desconectan automáticamente el circuito en caso de fallas, previniendo riesgos para el operador y los equipos.

El diseño del panel de control manual presenta diversas ventajas prácticas que lo hacen especialmente adecuado para este sistema. Su simplicidad operativa permite al operador gestionar el banco de carga de manera intuitiva, sin la necesidad de instrumentación compleja. Además, el panel está diseñado para garantizar la seguridad del sistema mediante

la incorporación de protecciones diferenciales, las cuales minimizan los riesgos al detectar y desconectar el circuito en caso de fallas eléctricas. Los indicadores LED integrados proporcionan un monitoreo visual inmediato del estado de los circuitos, facilitando la supervisión durante las pruebas. Asimismo, la flexibilidad del panel, que permite la activación y desactivación de grupos específicos de resistencias, posibilita la realización de pruebas bajo diversas condiciones de carga, adaptándose a las necesidades del proyecto.

El desarrollo del banco de carga resistivo para el motor Kubota DG972-E2 se fundamenta en una base teórica sólida que abarca los principios de funcionamiento de los bancos resistivos y los criterios técnicos necesarios para su diseño y operación. Este marco teórico incluye un análisis detallado sobre la selección de resistencias, destacando el uso de resistencias de cuarzo, y la importancia de los sistemas de enfriamiento, con un enfoque basado en la convección forzada en bancos de tubos para garantizar la eficiencia térmica. Además, se analizaron parámetros clave, como los números de Reynolds y Nusselt, esenciales para optimizar la transferencia de calor. También se describieron los dispositivos de medición, la estructura de soporte y el panel de control, componentes que aseguran la funcionalidad, la seguridad y la adaptabilidad del banco. Este marco teórico proporciona una guía integral para garantizar que las decisiones técnicas del proyecto cumplan con los objetivos planteados.

CAPITULO 3. Diseño del Banco de Carga Resistivo

El diseño del banco de carga resistivo constituye una etapa fundamental en el desarrollo del proyecto, ya que establece cómo los distintos componentes trabajarán de manera integrada para cumplir con los objetivos establecidos. Este capítulo detalla el proceso de diseño del banco, abarcando los aspectos eléctricos, térmicos, estructurales y de control, con el propósito de garantizar su funcionalidad, eficiencia y seguridad.

La conceptualización del banco se basa en los principios teóricos desarrollados previamente, adaptados a las necesidades específicas del motor Kubota DG972-E2. El diseño incluye la selección adecuada de resistencias, un sistema de enfriamiento por convección forzada, una estructura de soporte robusta y un panel de control manual que incorpora elementos de protección y monitoreo.

En este capítulo, se justifican las decisiones de diseño adoptadas, basándose tanto en los requerimientos técnicos como en las condiciones prácticas del proyecto. Asimismo, se presentan cálculos clave que validan la capacidad del banco para disipar el calor generado, garantizar la estabilidad mecánica y proporcionar al operador un control seguro y eficiente del sistema. Este enfoque asegura que el banco de carga resistivo cumpla con los estándares requeridos, adaptándose a las especificaciones y objetivos establecidos.

3.1. Diseño conceptual

El diseño conceptual del banco de carga resistivo para el motor Kubota DG972-E2 está orientado a proporcionar un sistema funcional y seguro que permita evaluar el desempeño del motor bajo diversas condiciones de carga. Este banco integra sistemas y componentes que interactúan de manera coordinada para cumplir con los requerimientos térmicos, eléctricos, estructurales y de control definidos. El sistema se compone de cinco elementos principales: el sistema de resistencias, el sistema de enfriamiento, la estructura de soporte, el panel de control manual y un sistema eléctrico que conecta y regula todos los componentes. Cada uno de estos elementos fue conceptualizado con base en los principios establecidos en el marco teórico y adaptado a las necesidades específicas del proyecto.

El núcleo del banco está constituido por las resistencias, encargadas de disipar la energía eléctrica en forma de calor, simulando condiciones reales de carga. Estas resistencias están organizadas en circuitos independientes que pueden ser activados o desactivados desde el

panel de control, lo que permite al operador ajustar la carga aplicada al motor según los requerimientos de las pruebas, ofreciendo flexibilidad y precisión durante la operación.

Para disipar el calor generado por las resistencias, se incorporó un sistema de enfriamiento por convección forzada. Este sistema utiliza un extractor ubicado en la parte superior del banco para impulsar el flujo de aire, mientras que la base abierta del diseño permite la entrada constante de aire fresco. Esta disposición asegura una disipación térmica eficiente, manteniendo las resistencias dentro de un rango operativo seguro.

La estructura de soporte fue diseñada para garantizar la estabilidad mecánica y la correcta disposición de los componentes del banco. Fabricada con materiales capaces de soportar altas temperaturas y cargas mecánicas, la estructura no solo proporciona soporte físico, sino que también facilita el acceso a los diferentes elementos para inspección y mantenimiento, asegurando así un funcionamiento confiable del sistema.

El panel de control constituye el principal medio de interacción entre el operador y el banco de carga. Este panel incluye interruptores que permiten activar y desactivar los grupos de resistencias, indicadores LED que muestran el estado operativo de cada circuito, un interruptor automático que controla la alimentación del sistema y protecciones diferenciales para garantizar la seguridad durante las pruebas. Su diseño simplifica la operación y proporciona un control seguro y eficiente del sistema.

El sistema eléctrico conecta y regula todos los componentes del banco. Diseñado para alimentar las resistencias y supervisar los parámetros eléctricos, incluye un multímetro digital que permite medir voltaje, corriente, potencia y energía. Este enfoque garantiza un monitoreo adecuado durante las pruebas y asegura que el banco opere dentro de los límites eléctricos establecidos, protegiendo tanto los equipos como al operador.

La interacción entre los diferentes componentes asegura un funcionamiento eficiente y seguro del banco de carga resistivo. Las resistencias generan calor de manera controlada, el sistema de enfriamiento disipa este calor eficientemente, la estructura proporciona estabilidad al conjunto y el panel de control facilita la operación del sistema. Todo esto asegura que el banco cumpla con los objetivos establecidos en el proyecto.

I. Distribución general del Banco de carga

El diseño del banco de carga resistivo fue desarrollado con un enfoque en la compactación, la funcionalidad y la operatividad, considerando las limitaciones eléctricas disponibles. Estas premisas influyeron directamente en la distribución de los componentes, garantizando que el equipo fuera eficiente en su desempeño, seguro y práctico para su manejo.

II. Compactación y organización de los componentes

La compactación del banco de carga resistivo fue una de las prioridades principales, orientada a optimizar el uso del espacio disponible sin comprometer el rendimiento ni la seguridad. Este enfoque permitió integrar todos los componentes esenciales en una estructura organizada y funcional, facilitando tanto su transporte como su instalación en diversos entornos.

La compactación se logró mediante la optimización de la disposición interna de las resistencias, el sistema de ventilación y el panel de control. Las resistencias se agruparon estratégicamente en una configuración escalonada, lo que maximiza la transferencia de calor y asegura un flujo de aire uniforme. Esta disposición mejora la eficiencia térmica, minimiza las zonas de sombra térmica y evita la acumulación de calor en áreas específicas.

El sistema de ventilación, ubicado en un extremo del banco, garantiza la circulación forzada del aire a través de las resistencias, disipando eficientemente el calor generado. Por su parte, el panel de control, colocado en una posición accesible, integra interruptores, indicadores LED y protecciones eléctricas, facilitando la operación manual del sistema y asegurando su funcionamiento bajo condiciones controladas.

Esta organización de los componentes permite que el banco mantenga un diseño compacto, funcional y adaptable a los requerimientos del proyecto. Además, cumple con las limitaciones eléctricas establecidas y garantiza un desempeño eficiente y seguro.

III. Disposición de las resistencias

Las resistencias, como elementos principales del banco de carga, fueron ubicadas estratégicamente en el centro del equipo para garantizar una distribución uniforme del calor y facilitar la circulación del flujo de aire generado por el sistema de ventilación. Esta disposición centralizada maximiza la eficiencia térmica del sistema, asegurando que el aire forzado atravesase todas las resistencias de manera uniforme, sin generar zonas de recirculación ni puntos de acumulación térmica.

Además, las resistencias fueron organizadas en un patrón escalonado, una configuración seleccionada específicamente para mejorar la transferencia de calor. Este diseño fomenta la formación de turbulencia en el flujo de aire, incrementando la interacción entre el fluido y la superficie de las resistencias. El patrón escalonado también permite una mayor densidad de resistencias en el espacio disponible, optimizando la compactación del banco sin comprometer su rendimiento térmico.

El espaciamiento entre las resistencias fue calculado cuidadosamente para equilibrar la transferencia de calor y la velocidad del flujo de aire. Este diseño asegura que todas las resistencias contribuyan de manera uniforme al rendimiento térmico del sistema, adaptándose a las limitaciones de potencia y espacio definidas en el proyecto. La ubicación centralizada, junto con el flujo de aire dirigido desde el ventilador, garantiza que el calor generado sea disipado de manera eficiente, manteniendo al equipo en condiciones seguras de operación.

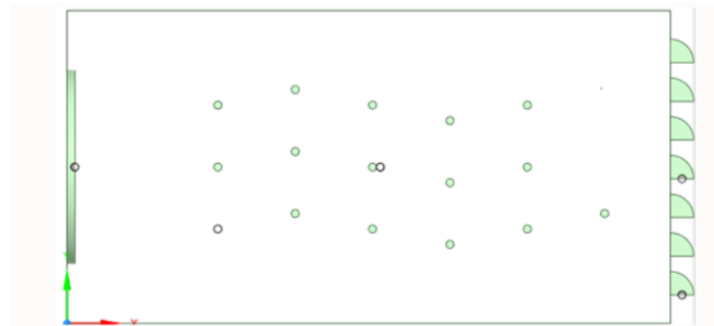


Figura 19. Distribución de las resistencias y ubicación del ventilador en el banco de carga resistivo.

Fuente: elaboración propia en ANSYS

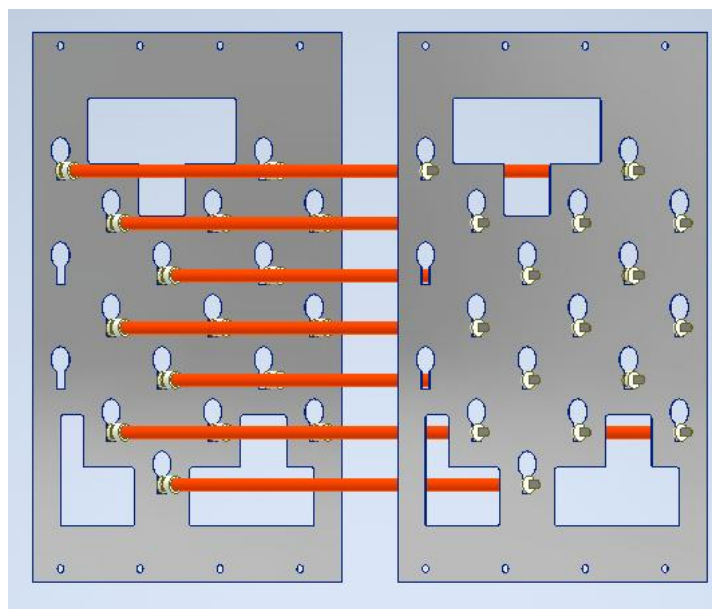


Figura 20. Distribución de las resistencias y sus soportes.

Fuente: elaboración propia en Inventor

IV. Sistema de Enfriamiento

El sistema de ventilación es un componente fundamental en el diseño del banco de carga resistivo, ya que garantiza la disipación eficiente del calor generado por las resistencias. En este proyecto, se implementó un sistema de convección forzada sobre bancos de tubos, compuesto por un ventilador y un extractor que trabajan en conjunto para mantener un flujo de aire constante a través del banco. Esta configuración optimiza la transferencia de calor y asegura un funcionamiento seguro del equipo.

El ventilador fue ubicado estratégicamente en uno de los extremos del banco para impulsar el aire hacia las resistencias, situadas en el centro de la estructura. Por su parte, el extractor, instalado en el extremo opuesto, facilita la salida eficiente del aire caliente generado durante el proceso. Esta combinación permite un flujo continuo y uniforme de aire que atraviesa las resistencias, maximizando la eficiencia térmica y eliminando zonas de recirculación o acumulación de calor.

La estructura del banco, junto con las rejillas de ventilación, guía el flujo de aire desde la entrada generada por el ventilador hasta la salida controlada por el extractor, permitiendo una

renovación constante del aire caliente con aire fresco. Esta configuración asegura que las resistencias operen dentro de un rango de temperaturas seguro, previniendo sobrecalentamientos y prolongando la vida útil del equipo.

Dado el diseño compacto del banco, el sistema de ventilación fue cuidadosamente adaptado para integrarse sin ocupar espacio adicional. La selección de la capacidad del ventilador y del extractor consideró propiedades del aire, como su densidad y temperatura promedio, así como las dimensiones del banco, garantizando un flujo suficiente para disipar el calor generado por las resistencias. Además, la disposición escalonada de las resistencias fomenta la turbulencia en el flujo de aire, aumentando la interacción entre el aire y las superficies calientes, lo que mejora aún más la transferencia de calor.

Este sistema, compuesto por el ventilador y el extractor, no solo asegura una disipación adecuada del calor, sino que también refleja el enfoque del proyecto hacia un diseño funcional y eficiente, adaptado a las limitaciones espaciales y eléctricas del equipo.

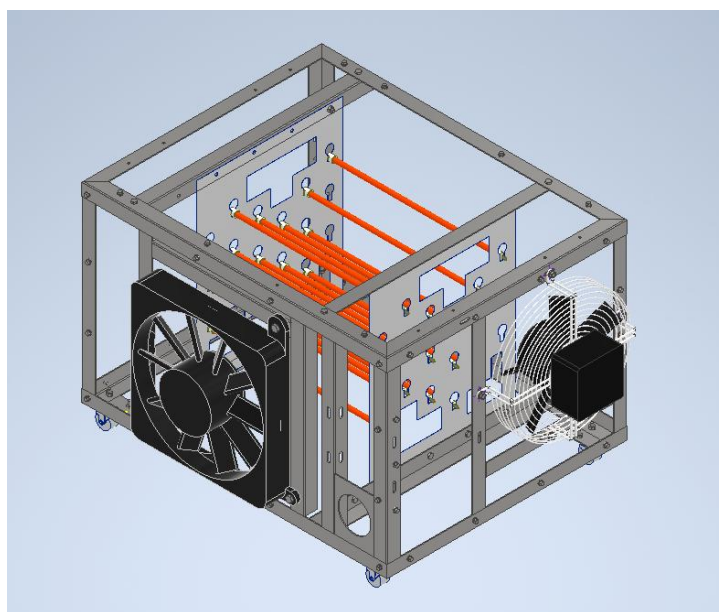


Figura 21. Disposición del sistema de enfriamiento.

Fuente: elaboración propia en Inventor

V. Diseño conceptual del panel de control

El panel de control es un elemento esencial en el diseño conceptual del banco de carga resistivo, ya que permite la interacción directa del usuario con el equipo, facilitando el manejo y control de los diferentes grupos de resistencias y asegurando un funcionamiento seguro y eficiente.

En este proyecto, el panel de control fue diseñado con un enfoque manual y práctico, integrando los siguientes elementos clave:

- **Switches de Control:** Cada grupo de resistencias cuenta con un switch independiente que permite activar o desactivar las cargas de manera selectiva. Esto brinda al usuario la posibilidad de ajustar el nivel de carga según los requerimientos de la prueba, manteniendo el control dentro de los límites de potencia establecidos.
- **Indicadores LED:** Cada switch está acompañado por un LED piloto que indica visualmente el estado del circuito correspondiente, es decir, si un grupo de resistencias está activo o inactivo. Esto facilita la supervisión rápida del estado del banco, especialmente durante las pruebas.
- **Protecciones Eléctricas:** El panel incluye protecciones diferenciales y un interruptor automático, que actúan como mecanismos de seguridad para proteger al equipo y al usuario en caso de sobrecargas, cortocircuitos o fallas en el sistema eléctrico. Estas medidas garantizan un funcionamiento confiable bajo condiciones normales y en situaciones de emergencia.
- **Diseño Compacto y Accesible:** El panel de control fue diseñado para ser compacto y se encuentra ubicado en la parte frontal del banco, en una posición accesible para el operador. Esto asegura una interacción cómoda y eficiente durante el manejo del equipo, sin interferir con otros componentes del banco.

El diseño del panel de control complementa la funcionalidad del banco de carga resistivo al proporcionar una interfaz intuitiva y segura para su operación. Su estructura modular permite un manejo flexible de las resistencias, optimizando la funcionalidad general del equipo. Además, la integración de indicadores visuales y protecciones refuerza el enfoque en la seguridad y confiabilidad del sistema.

VI. Limitaciones del diseño conceptual

Una de las principales limitaciones del diseño conceptual del banco de carga resistivo estuvo relacionada con el conector principal comercial, cuya selección dependió del tipo de alimentación eléctrica disponible. Dado que el banco fue diseñado para operar con un suministro de 220 V monofásico, se eligió conector principal una hembra embutida IP44 32A 2P+T. Este tipo de conector, aunque adecuado para garantizar la protección y seguridad del sistema, impuso un límite en la corriente máxima manejable de 32 A.

Esta restricción eléctrica, derivada de la capacidad del conector, tuvo un impacto directo en la potencia máxima del equipo, la cual quedó limitada según el cálculo mostrado en la Figura X. Este cálculo considera las especificaciones del suministro eléctrico y las características del conector.

$$P_{\text{máx}} = V * I = 220 \text{ V} \cdot 32 \text{ A} = 7040 \text{ W (7.04 kW)} \quad \text{ecuación N°26}$$

Ecuación N°26. Ecuación y cálculo de la potencia máxima que puede llegar el Banco de Carga basado en el suministro eléctrico y las especificaciones del conector principal.

La potencia máxima determinada condicionó tanto la selección de las resistencias como la configuración de los circuitos eléctricos del banco, limitando su capacidad para simular cargas de mayor potencia. Esta restricción puede representar un desafío en aplicaciones más exigentes o en el análisis de motores de mayor capacidad.

VII. Resumen de sección

El diseño conceptual del banco de carga resistivo para el motor Kubota DG972-E2 integra de manera eficiente los sistemas y componentes necesarios para cumplir con los objetivos del proyecto, priorizando la funcionalidad, la seguridad y la eficiencia térmica. Los elementos principales incluyen el sistema de resistencias, el sistema de enfriamiento, la estructura de soporte, el panel de control manual y el sistema eléctrico. Cada componente fue cuidadosamente seleccionado y configurado para operar de manera coordinada, respetando las limitaciones eléctricas y espaciales del diseño.

La disposición escalonada de las resistencias maximiza la transferencia de calor al generar turbulencias en el flujo de aire, lo que mejora la eficiencia térmica del sistema. El sistema de ventilación, compuesto por un ventilador y un extractor, asegura una disipación térmica efectiva, evitando la acumulación de calor y manteniendo las resistencias dentro de un rango operativo seguro. La estructura de soporte proporciona estabilidad y facilita el acceso a los componentes, simplificando las tareas de mantenimiento. Por su parte, el panel de control, ubicado estratégicamente en un costado del banco, permite la activación selectiva de las resistencias, integra protecciones eléctricas y ofrece un manejo intuitivo.

Aunque el diseño presenta limitaciones, como la restricción de potencia derivada del uso de un conector comercial de 220 V monofásico con una capacidad máxima de 32 A, estas fueron mitigadas mediante una configuración que optimiza la operatividad y el desempeño del banco. Este enfoque asegura que el equipo cumpla con los requerimientos del proyecto, proporcionando una solución eficiente y segura para las pruebas del motor.

3.2. Diseño del sistema eléctrico

El sistema eléctrico del banco de carga resistivo constituye una parte esencial del diseño general, ya que garantiza la operatividad y seguridad del equipo, permitiendo el control y la supervisión de las cargas conectadas. Este sistema fue diseñado considerando las limitaciones eléctricas de la alimentación disponible, específicamente el uso de una fuente de 220 V monofásico con una capacidad máxima de 32 A, así como las necesidades específicas de los distintos componentes, como las resistencias, los LED pilotos, los ventiladores y las protecciones eléctricas.

El diseño integra elementos clave, como el cableado, las protecciones, los medidores y un panel de control manual, que permiten un manejo seguro y eficiente del sistema. Además, se optimizó el uso de los recursos eléctricos mediante la selección de cables adecuados para zonas de alta y baja carga, asegurando la compatibilidad con el diseño compacto del banco.

La implementación del sistema eléctrico no solo garantiza que el banco funcione de manera eficiente bajo las condiciones previstas, sino que también prioriza la seguridad tanto del operador como del equipo. En esta sección se describen los componentes principales, las conexiones, las protecciones y las justificaciones técnicas que respaldan las decisiones de diseño.

El diseño del sistema eléctrico responde a una serie de objetivos específicos que aseguran su operatividad, seguridad y cumplimiento con los requerimientos técnicos del proyecto. Estos objetivos son:

- **Control seguro y eficiente de las resistencias:** Diseñar circuitos independientes que permitan ajustar las cargas conectadas de manera sencilla y efectiva, según las necesidades de prueba.
- **Protección del sistema y del operador:** Incorporar elementos de seguridad, como protecciones diferenciales e interruptores automáticos, para prevenir sobrecargas, cortocircuitos y fallas eléctricas.
- **Cumplimiento de normativas eléctricas:** Diseñar el sistema eléctrico de acuerdo con las normativas vigentes, asegurando la confiabilidad del equipo y la seguridad de los operadores.
- **Supervisión en tiempo real:** Facilitar el monitoreo del estado del sistema mediante la integración de medidores de voltaje y corriente.
- **Optimización del diseño eléctrico:** Seleccionar materiales y componentes que permitan una distribución eficiente de la energía, minimizando pérdidas y asegurando compatibilidad con el diseño compacto del banco.

3.2.1. Componentes principales del sistema eléctrico

El sistema eléctrico del banco de carga resistivo integra diversos componentes que trabajan de manera conjunta para garantizar la operatividad, la seguridad y la funcionalidad del equipo. Cada uno de estos elementos cumple una función específica dentro del diseño y ha sido seleccionado considerando las limitaciones y necesidades del proyecto.

I. Resistencias



Figura 22. Resistencia de estufas de cuarzo.

Fuente: EHAC. (n.d.). *Barra de cuarzo estufa eléctrica 35 cm*. Recuperado de <https://www.ehac.cl/barra-de-cuarzo-estufa-electrica-35cm>

Las resistencias utilizadas en el banco de carga resistivo corresponden al tipo comúnmente empleado en estufas de cuarzo. Estas resistencias están diseñadas para operar con una potencia nominal de 400 W y a una tensión de 220 V. Su resistencia eléctrica oscila entre 120 y 130 Ohms, lo que les permite manejar un flujo de corriente en el rango de 1.7 a 1.8 A.

La selección de estas resistencias estuvo motivada por:

- **Costo accesible:** Son económicas en comparación con otros tipos de resistencias industriales.
- **Disponibilidad:** Son fáciles de adquirir en el mercado local, lo que facilita su reemplazo o mantenimiento en caso de ser necesario.
- **Compatibilidad eléctrica:** Su potencia y valores resistivos cumplen con los requisitos del diseño eléctrico del banco, permitiendo una integración eficiente.

II. Cableado

El sistema de cableado del banco de carga resistivo es un elemento esencial para garantizar una distribución eficiente y segura de la energía eléctrica a los diferentes componentes del equipo. Se seleccionaron dos tipos principales de cables para este proyecto, cada uno adaptado a las necesidades específicas de las zonas de mayor y menor carga del sistema eléctrico.

Cable THHN 10 AWG:

Este cable es utilizado en las áreas de mayor carga del sistema, como las conexiones principales desde el conector de alimentación hasta las protecciones diferenciales. Su diseño permite manejar corrientes elevadas y soportar condiciones térmicas exigentes.

- **Razón de selección:**

Alta capacidad de corriente: Ideal para manejar la corriente máxima permitida por el conector principal del sistema.

Durabilidad: Resistente a altas temperaturas y condiciones abrasivas.

Disponibilidad comercial: Fácil de adquirir en el mercado local, lo que facilita el mantenimiento o la ampliación del sistema.

Cable Libre de Halógenos H07Z1-K 2.5 mm²

Este cable se utiliza en las zonas de menor carga del sistema, incluyendo las conexiones hacia las resistencias y los indicadores LED. Está diseñado para garantizar la seguridad en caso de incendio al no emitir gases tóxicos.

- **Razón de selección:**

Seguridad: Libre de halógenos, no propaga la llama y tiene baja emisión de humos en caso de incendio.

Compatibilidad: Adecuado para las corrientes requeridas en las conexiones de resistencias y circuitos auxiliares.

Flexibilidad: Fácil de instalar en espacios reducidos debido a su diseño compacto y flexible.

Distribución del cableado

- **Conexiones principales:** Desde el conector de alimentación hasta las protecciones diferenciales, se utiliza el cable THHN 10 AWG debido a su capacidad para manejar altas corrientes.
- **Conexiones auxiliares:** Desde las protecciones diferenciales hacia las resistencias y los LED, se utiliza el cable libre de halógenos 2.5 mm², optimizando los recursos y garantizando la seguridad

III. Panel de control

El panel de control es el núcleo de operación del banco de carga resistivo, permitiendo al operador gestionar manualmente los diferentes circuitos. Está diseñado para ofrecer un manejo seguro y eficiente de las resistencias y el sistema eléctrico, integrando elementos esenciales para el control y la protección del equipo.

Componentes del panel de control:

Switches independientes:

Los switches utilizados en el panel de control del banco de carga resistivo son del modelo Xunma XM1-23, seleccionados por su capacidad de manejar corrientes adecuadas para los circuitos del sistema. Cada switch está asignado a un grupo de resistencias, lo que permite al operador activar o desactivar circuitos específicos de manera modular.



Figura 23. Interruptor doble modelo Xunma XM1-23.

Fuente: Xunma. (n.d.). *Interruptor basculante doble*. Recuperado de http://cxzmdz.com/?products_23/108.html

Los switches desempeñan un papel fundamental en el control modular del banco de carga resistivo. Cada switch está asignado a un grupo de resistencias, lo que permite ajustar la carga conectada de manera flexible, según los requisitos específicos de cada prueba. Su diseño ergonómico y robusto asegura un manejo sencillo y seguro, facilitando la operación del sistema incluso en condiciones de uso prolongado o repetitivo.

La selección de los switches Xunma XM1-23 se basó principalmente en su disponibilidad, ya que formaban parte de las estufas de cuarzo de las cuales se obtuvieron las resistencias. Esta accesibilidad, junto con sus parámetros técnicos adecuados para el sistema, como una capacidad de operación de 250 VAC y 16 A, los convirtió en una opción eficiente y económica para el diseño del banco de carga resistivo. Además, su robustez y confiabilidad aseguraron un desempeño seguro y confiable dentro del sistema.

Indicadores LED:

Los indicadores LED modelo AD22-22DS son componentes esenciales en el panel de control del banco de carga resistivo, proporcionando señales visuales claras sobre el estado operativo de los circuitos.



Figura 24. Indicador luminoso LED modelo AD22-22DS.

Fuente: Xider. (n.d.). *AD22-22DS LED Pilot Light*. Recuperado de <https://www.xider.cc/led-indicator-light/ad22-22ds-led-pilot-light.htm>

Los indicadores LED desempeñan una función esencial en el sistema al proporcionar una señal visual clara sobre el estado de los circuitos. Cada LED está asociado a un grupo de resistencias y se ilumina cuando el circuito correspondiente está activo, permitiendo al operador identificar de manera rápida y precisa qué secciones del banco están en funcionamiento. Además, estos indicadores contribuyen a mejorar la seguridad operativa al

minimizar el riesgo de errores, como la activación inadvertida de circuitos, garantizando un manejo más seguro y eficiente del sistema.

Protecciones eléctricas:

❖ Interruptor automático:

El interruptor automático termomagnético seleccionado para el sistema eléctrico del banco de carga resistivo es el modelo Lexo EBS3B-63, diseñado para proteger instalaciones eléctricas de baja tensión contra sobrecargas y cortocircuitos.



Figura 25. Interruptor automático monopolar de 32A, curva C.

Fuente: Ferrelectrica. (n.d.). *Interruptor automático 1x32A 10kA curva C*. Recuperado de <https://www.ferrelectrica.cl/product/automatico-1x32a-10ka-curva-c-lexohtml>

El interruptor automático desempeña una función crucial en la protección del sistema eléctrico del banco de carga resistivo, ya que interrumpe el suministro eléctrico en caso de sobrecargas o cortocircuitos. Este mecanismo garantiza la seguridad tanto del equipo como del operador, previniendo daños en los componentes y posibles riesgos durante la operación.

La elección del interruptor Lexo EBS3B-63 se fundamentó en su capacidad para manejar corrientes de hasta 32 A y su alta capacidad de corte de 10 kA, características que lo hacen adecuado para las demandas del sistema. Además, su curva de disparo tipo C es especialmente apropiada para proteger circuitos con cargas inductivas moderadas, como las presentes en el banco de carga resistivo.

❖ Interruptor diferencial:

El interruptor diferencial seleccionado para el sistema eléctrico del banco de carga resistivo es el modelo Lexo EBS6R, diseñado para proteger a las personas frente a contactos directos e indirectos con elementos energizados y para prevenir riesgos de incendio causados por fallas de aislamiento.



Figura 26. Interruptor diferencial bipolo de 25A, 30mA, marca Lexo.

Fuente: Ferrelectrica. (n.d.). *Interruptor diferencial 2x25A 30mA Lexo certificado*. Recuperado de <https://www.ferrelectrica.cl/product/interruptor-diferencial-2x25a-30ma-lexo-certificado>

El interruptor diferencial desempeña un papel fundamental en la protección del sistema eléctrico del banco de carga resistivo, ya que detecta corrientes de fuga a tierra y desconecta el suministro eléctrico en caso de anomalías. Este mecanismo protege a los usuarios de posibles descargas eléctricas y previene incendios originados por fallas de aislamiento.

La elección del interruptor diferencial Lexo EBS6R se fundamentó en su capacidad para manejar una corriente nominal de 25 A y su alta sensibilidad de 30 mA, características que lo hacen adecuado para las necesidades del banco de carga resistivo. Además, su rápida respuesta, inferior a 0.1 segundos, y su construcción robusta garantizan una protección efectiva y duradera.

Multímetro:

El PZEM-061 es un medidor digital multifuncional diseñado para monitorear parámetros eléctricos en sistemas de corriente alterna (CA). Este dispositivo mide voltaje, corriente,

potencia activa y energía consumida, proporcionando datos precisos y en tiempo real a través de su pantalla LCD de gran tamaño.

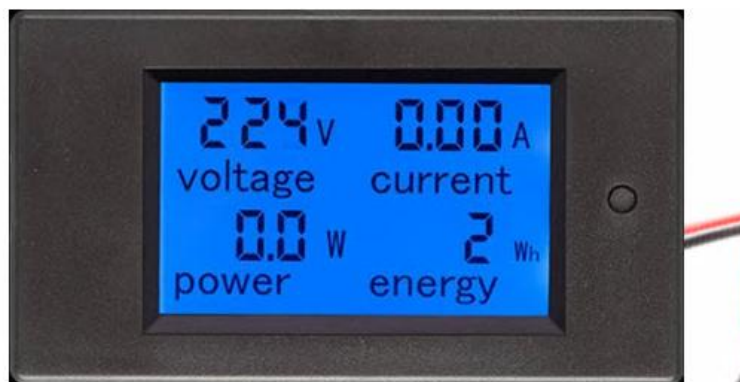


Figura 27. Medidor de parámetros eléctricos Peacefair modelo PZEM-061.

Fuente: Solar Thailand. (n.d.). *PZEM-061 AC Meter with CT*. Recuperado de <https://www.solar-thailand.co.th/EN/Product.asp?Data1=PZEM-061-CT>

El medidor digital PZEM-061 desempeña una función esencial en el sistema eléctrico del banco de carga resistivo, al proporcionar un monitoreo continuo y preciso de los parámetros eléctricos fundamentales. Este dispositivo permite medir el voltaje, la corriente, la potencia activa y la energía consumida en tiempo real, facilitando la supervisión del estado operativo del sistema y la detección de posibles ineficiencias. Además, su función de alarma de sobrecarga alerta al operador cuando la potencia supera el umbral establecido, contribuyendo a prevenir fallas en el equipo.

La elección del medidor PZEM-061 se basó en sus capacidades avanzadas y su adaptabilidad al sistema. Entre los factores que respaldan su inclusión se encuentran:

- **Medición Integral:** Su capacidad para medir múltiples parámetros eléctricos lo convierte en una herramienta versátil y completa, eliminando la necesidad de dispositivos adicionales.
- **Precisión y Confiabilidad:** Con una precisión clase 1.0, este medidor garantiza resultados confiables, esenciales para evaluar el rendimiento del banco de carga.
- **Fácil Instalación:** Su diseño compacto y la inclusión de un transformador de corriente facilitan la integración en el sistema eléctrico del banco.

- **Alarma de Sobrecarga:** Proporciona una capa adicional de seguridad, alertando al operador sobre posibles riesgos antes de que se produzcan fallas.
- **Costo-Eficiencia:** Ofrece una excelente relación costo-beneficio, proporcionando funcionalidades avanzadas a un precio accesible.
- **Interfaz Intuitiva:** La pantalla LCD de gran tamaño y su retroiluminación ajustable aseguran una fácil lectura, incluso en entornos con poca iluminación.

Ubicación y Diseño:

El panel de control del banco de carga resistivo constituye el centro de operación y supervisión del sistema eléctrico. Su diseño está orientado a facilitar el manejo de los circuitos y garantizar la seguridad del operador. La estructura del panel está fabricada en una plancha de acero de 1 mm de espesor, lo que proporciona robustez y durabilidad, además de un diseño compacto y organizado.

El panel de control se encuentra ubicado en un costado del banco de carga, perpendicular al ventilador y paralelo al extractor. Esta disposición asegura una accesibilidad óptima y permite una distribución eficiente de los componentes, favoreciendo tanto la operación como el mantenimiento del sistema.

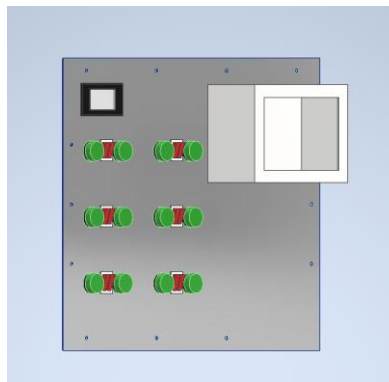


Figura 28. Diseño del panel de control del banco de carga resistivo, mostrando la disposición de los componentes principales

Fuente: Elaboración propia en Inventor

- **Indicadores LED:** De color verde, están dispuestos en el lado izquierdo y derecho de cada switch. Se iluminan cuando el circuito correspondiente está activo, proporcionando una indicación visual clara del estado de las resistencias.
- **Switches:** Ubicados entre los LED, controlan de forma independiente cada grupo de resistencias, permitiendo modular la carga del banco.
- **Multímetro Digital (PZEM-061):** Instalado en la esquina superior izquierda, monitorea parámetros como voltaje, corriente, potencia y energía consumida.
- **Caja de Protecciones Eléctricas (Calota):** Localizada en la esquina superior derecha, contiene el interruptor automático y el interruptor diferencial, resguardando estos dispositivos críticos de forma segura.

Este diseño del panel de control cumple con los siguientes objetivos:

- **Facilidad de Uso:** La disposición de los componentes facilita el manejo seguro e intuitivo del sistema.
- **Seguridad:** Los dispositivos de protección están adecuadamente resguardados, y los LED indicadores ayudan a evitar errores operativos.
- **Compactación:** El panel aprovecha el espacio disponible para integrar todos los elementos necesarios sin comprometer la funcionalidad.
- **Durabilidad:** La construcción en acero y el uso de componentes de calidad garantizan la longevidad del panel.

El panel está ubicado en un costado del banco, perpendicular al ventilador y paralelo al extractor. Esta disposición facilita el acceso del operador sin interferir con el flujo de aire ni con el mantenimiento de otros componentes. Su diseño compacto garantiza que los switches, indicadores LED y protecciones estén organizados de manera intuitiva, permitiendo una operación eficiente y segura..

IV. Ventiladores

Los ventiladores desempeñan un papel crucial en el sistema eléctrico del banco de carga resistivo al garantizar una adecuada disipación del calor generado por las resistencias. Este

sistema de ventilación activa está compuesto por dos ventiladores que trabajan en conjunto para mantener temperaturas operativas seguras y asegurar la eficiencia térmica del banco.

Características de los ventiladores

Ventilador principal:

- Tensión de operación: 12 V.
- Potencia: 90 W.
- Consumo de corriente: 7.5 A.

Este proporciona el flujo de aire necesario para atravesar el banco de resistencias, promoviendo una transferencia de calor eficiente y uniforme. Además, Instalado en el centro del banco, generando un flujo directo hacia las resistencias.

Extractor:

- Tensión de operación: 220 V.
- Potencia: 51 W.
- Consumo de corriente: 0.23 A.

El extractor complementa al ventilador principal al extraer el calor acumulado dentro del banco y mejorar la circulación del aire. Este componente está situado en el costado del banco, paralelo al panel de control.

El sistema eléctrico del banco de carga resistivo integra los ventiladores de manera independiente para garantizar un enfriamiento eficiente y seguro. El ventilador principal, de 12 V y 90 W, es alimentado a través de un adaptador de corriente que convierte la tensión de 220 V AC a 12 V DC, asegurando un suministro constante y estable. Por su parte, el extractor, de 220 V y 51 W, está conectado directamente al sistema eléctrico principal de 220 V AC, lo que simplifica su integración. Ambos ventiladores están controlados desde el panel de control, permitiendo sincronizar su funcionamiento con los demás componentes del banco y protegerlos ante posibles sobrecargas o cortocircuitos mediante los dispositivos de seguridad integrados en el sistema.

La inclusión de los ventiladores en el sistema eléctrico del banco de carga resistivo es fundamental para garantizar un enfriamiento activo eficiente, ya que desempeñan un papel clave en la disipación del calor generado por las resistencias durante la operación. Su correcta implementación permite mantener una temperatura segura dentro del banco, evitando el sobrecalentamiento de los componentes y asegurando la estabilidad operativa del sistema.

Además, la combinación del ventilador principal y el extractor optimiza el flujo de aire, maximizando la transferencia de calor hacia el ambiente y mejorando la eficiencia térmica del sistema. Este diseño no solo garantiza la funcionalidad del equipo, sino que también contribuye a la durabilidad de los componentes al operar bajo condiciones térmicas controladas.

La justificación técnica para la selección de estos ventiladores, así como los parámetros considerados para su elección, se desarrollarán en detalle en el punto correspondiente al diseño del sistema de enfriamiento.

V. Conector principal

El conector principal del banco de carga resistivo es una hembra embutida industrial diseñada para proporcionar una conexión eléctrica segura y confiable. Este componente es esencial para la alimentación del sistema, asegurando una transmisión eficiente de energía y cumpliendo con los estándares de seguridad requeridos.

El conector hembra embutido industrial actúa como el punto de entrada de la alimentación eléctrica al banco de carga resistivo. Su diseño embutido permite una instalación discreta y segura, minimizando la exposición de las conexiones eléctricas y reduciendo el riesgo de daños o manipulaciones accidentales. La configuración de 2P+T garantiza una conexión estable y eficiente, facilitando el suministro de energía necesario para el óptimo funcionamiento del sistema.

La elección de este conector se fundamenta en su capacidad para satisfacer las demandas operativas del banco de carga resistivo. Con una corriente nominal de 32 A, el conector es capaz de manejar la energía requerida por el sistema, asegurando un suministro eléctrico

seguro y estable. Además, su compatibilidad con una tensión nominal de 220 V permite una integración sencilla con la alimentación monofásica disponible.

El diseño embutido optimiza el uso del espacio y mejora la organización del sistema, mientras que los materiales de alta calidad utilizados en su construcción, como plástico de alto impacto y contactos niquelados, le proporcionan gran resistencia y durabilidad. Este conector no solo cumple con los requisitos técnicos del banco, sino que también ofrece una solución práctica y eficiente para la alimentación eléctrica, garantizando un rendimiento confiable a largo plazo.

3.2.2. Esquema eléctrico

Con los componentes principales del sistema eléctrico del banco de carga resistivo ya descritos, el siguiente paso consiste en analizar el esquema eléctrico que integra y organiza estos elementos. Este esquema representa la distribución de los circuitos, las conexiones entre los componentes y las protecciones implementadas para garantizar el correcto funcionamiento y la seguridad del sistema.

El diagrama eléctrico proporciona una visión general del diseño, ilustrando cómo interactúan las resistencias, el panel de control, los ventiladores y el resto de los elementos del sistema. Asimismo, permite identificar la disposición de las protecciones y las rutas del cableado, asegurando que cada componente opere dentro de los parámetros establecidos. A continuación, se presenta una descripción detallada del esquema eléctrico y su función dentro del diseño del banco de carga resistivo.

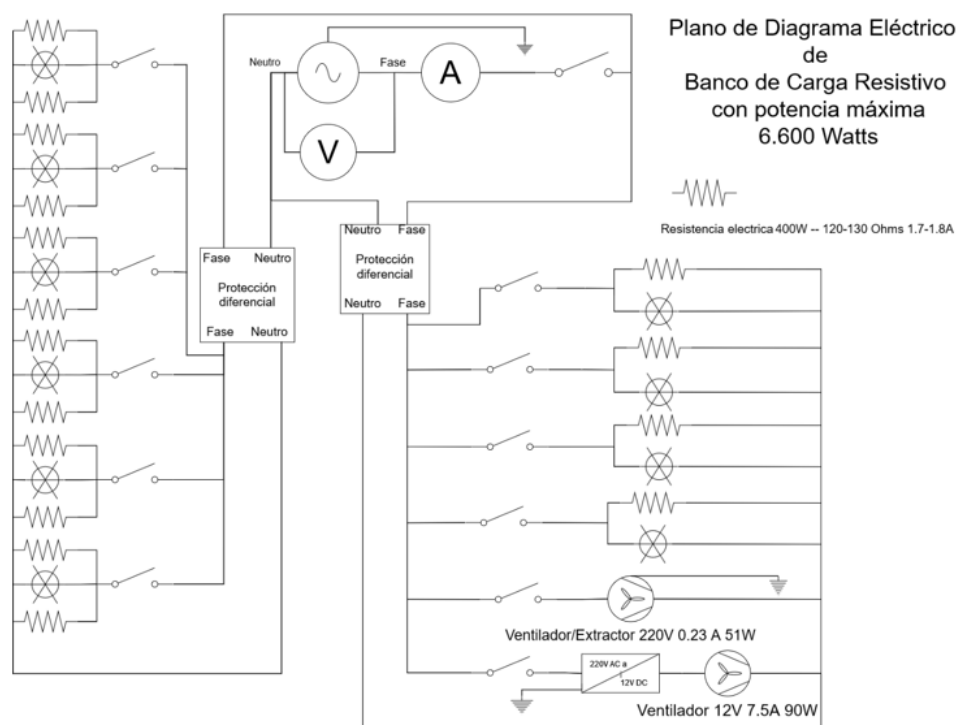


Figura 29. Diseño del diagrama eléctrico del Banco de Carga

Fuente: Elaboración propia

El diagrama eléctrico presentado corresponde al sistema del banco de carga resistivo, diseñado para operar con una potencia máxima de 6.600 W y bajo una alimentación de 220 V monofásico. Este diagrama ilustra las conexiones entre los diferentes componentes del sistema y la distribución de la energía eléctrica dentro del banco.

El sistema eléctrico del banco de carga resistivo integra diversos elementos clave que trabajan en conjunto para garantizar su operatividad y seguridad. A continuación, se describen los principales componentes ilustrados en el diagrama eléctrico:

- I. **Alimentación eléctrica:** La alimentación del sistema se realiza a través de un conector principal diseñado para operar a 220 V con una capacidad máxima de 32 A. Desde este punto, la energía se distribuye hacia los circuitos mediante un interruptor automático y un interruptor diferencial, que actúan como protecciones esenciales para evitar sobrecargas y cortocircuitos.
- II. **Panel de control:** El panel de control permite gestionar de manera modular los circuitos del banco. Este incluye switches independientes que controlan pequeños

grupos de resistencias de 400 W o 800 W, según los requisitos de la prueba. Los switches están acompañados por indicadores LED conectados en paralelo, que proporcionan una señal visual clara del estado de cada circuito, facilitando tanto la operación como la supervisión del sistema.

- III. **Circuito de resistencias:** Las resistencias de 400 W están conectadas en paralelo, optimizando la distribución eléctrica y reduciendo el valor de la corriente total en cada circuito. Esta configuración no solo garantiza un funcionamiento eficiente y seguro, sino que también permite ajustar la carga del banco de manera flexible, gracias al control modular proporcionado por los switches.
- IV. **Medición eléctrica:** La medición de los parámetros eléctricos se realiza mediante un voltímetro y un amperímetro integrados en un multímetro digital. Estos dispositivos monitorean en tiempo real parámetros críticos como el voltaje, la corriente y la potencia, proporcionando información clave para el control y supervisión del sistema.
- V. **Sistema de ventilación:** El sistema de ventilación incluye un ventilador de 12 V y 90 W, alimentado mediante un adaptador que convierte los 220 V AC a 12 V DC. Este ventilador trabaja en conjunto con un extractor de 220 V y 51 W, complementando el flujo de aire y asegurando una disipación térmica eficiente. Esta combinación garantiza que el banco de carga mantenga temperaturas seguras durante su operación, protegiendo los componentes y optimizando el rendimiento.

En conjunto, estos elementos aseguran que el sistema eléctrico del banco de carga resistivo funcione de manera confiable, segura y eficiente, cumpliendo con los objetivos establecidos para el proyecto.

3.2.3. Justificación del diseño del sistema eléctrico

El diseño del sistema eléctrico del banco de carga resistivo fue concebido para cumplir con los objetivos de funcionalidad, seguridad y eficiencia. La configuración del sistema responde a las necesidades específicas del equipo, considerando las limitaciones impuestas por la alimentación eléctrica y las características de los componentes disponibles.

El uso de resistencias de 400 W conectadas en paralelo garantiza flexibilidad en la carga aplicada y optimiza la distribución de corriente, reduciendo el riesgo de sobrecarga en los

circuitos. Los switches modulares, junto con los indicadores LED, facilitan un control intuitivo y seguro del sistema. Además, las protecciones eléctricas, como el interruptor automático y el diferencial, aseguran la integridad del equipo y la seguridad del operador durante su funcionamiento.

El sistema de ventilación, compuesto por un ventilador y un extractor, fue seleccionado para mantener un flujo de aire constante y eficiente, disipando el calor generado por las resistencias y asegurando que el sistema opere dentro de un rango de temperaturas seguro. La alimentación del ventilador, mediante un adaptador que convierte 220 V AC a 12 V DC, y el suministro directo de 220 V AC al extractor, permiten una integración óptima dentro del sistema eléctrico general.

El conector principal se eligió en función de su capacidad para manejar la corriente requerida y su compatibilidad con la alimentación monofásica disponible, cumpliendo con los estándares de calidad y seguridad necesarios para este tipo de equipos.

En conjunto, estas decisiones de diseño aseguran que cada componente del sistema eléctrico contribuya de manera eficiente a la operación segura y confiable del banco de carga resistivo. La disposición de los elementos fue diseñada para maximizar la funcionalidad y facilitar el manejo del equipo, mientras que las protecciones eléctricas garantizan el cumplimiento de las normativas de seguridad.

Este diseño no solo permite realizar pruebas de carga de manera efectiva, sino que también prioriza la durabilidad de los componentes y la seguridad del operador. La combinación de un sistema de control intuitivo, una disipación térmica adecuada y una configuración bien planificada garantiza que el banco de carga resistivo cumpla con los objetivos del proyecto, proporcionando una solución práctica y eficiente para las necesidades planteadas.

3.3. Diseño estructural del banco de carga resistivo

El diseño estructural del banco de carga resistivo fue desarrollado para garantizar un soporte seguro y estable para los componentes eléctricos y mecánicos, así como para proporcionar portabilidad y funcionalidad. Este diseño combina materiales de bajo costo y facilidad de fabricación con un enfoque en la estabilidad, resistencia y ergonomía.

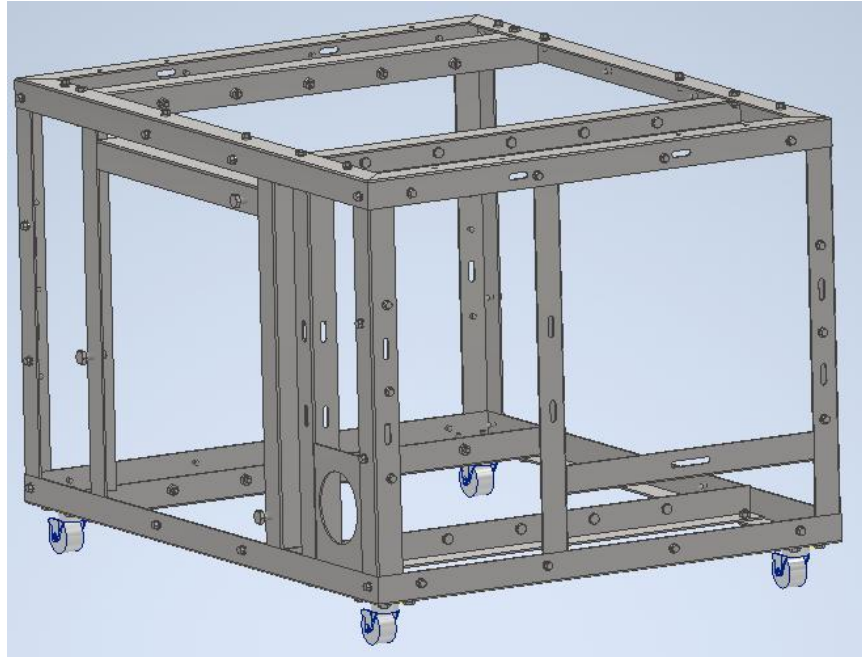


Figura 30. Estructura del Banco de Carga Resistivo

Fuente: Elaboración propia en Inventor

La estructura presentada en la figura 25 tiene las siguientes dimensiones:

- **Ancho:** 700 mm.
- **Largo:** 550 mm.
- **Alto:** 440 mm.

El material principal utilizado es ángulo doblado de acero de 30 mm x 30 mm x 2 mm, elegido por su robustez, disponibilidad y costo accesible. Este material fue adquirido en el mercado local, cumpliendo con los requisitos de soporte estructural y resistencia térmica necesarios para el proyecto.

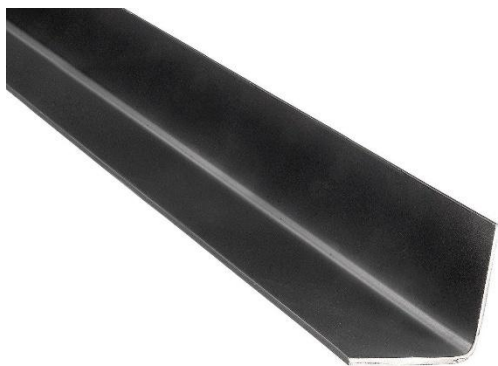


Figura 31 Perfil ángulo de acero de 30x30x2 mm

Fuente: Easy Chile. (n.d.). *Perfil ángulo 30x30x2 mm, 6 m, 5.34 kg*. Recuperado de <https://www.easy.cl/perfil-angulo-30x30x2-mm-6-m-5-34-kg-119206/p>

La estructura del banco de carga resistivo fue ensamblada mediante soldadura con electrodo Indura 6011 de 3/32" (2,4 mm), un tipo de electrodo celulósico conocido por su penetración profunda y su versatilidad para trabajar en todas las posiciones. Las soldaduras completas garantizan la rigidez y estabilidad de la estructura, permitiendo que soporte las cargas dinámicas y térmicas generadas durante la operación del banco.

Para facilitar su movilidad, la base de la estructura está equipada con cuatro ruedas de PVC naranja con placa giratoria y freno. Estas ruedas tienen una capacidad de carga de hasta 50 kg cada una, lo que asegura que la estructura, junto con los componentes eléctricos y mecánicos, quede adecuadamente estabilizada. Los frenos integrados en cada rueda garantizan que el banco permanezca fijo durante su operación, proporcionando seguridad y estabilidad.

Las tapas de la estructura cumplen dos funciones principales: proteger los componentes internos y dirigir el flujo de aire caliente hacia la rejilla de escape o el suelo, asegurando la eficiencia térmica del sistema. La mayoría de estas tapas están fabricadas con zinc alum de 0,35 mm de espesor, un material seleccionado por su ligereza, resistencia a la corrosión y bajo costo, lo que garantiza durabilidad y funcionalidad en el diseño. Una excepción notable es la tapa correspondiente al panel de control, construida en acero de 1 mm de espesor. Esta elección responde a la necesidad de soportar elementos eléctricos, como switches,

indicadores LED e interruptores, proporcionando mayor rigidez y estabilidad estructural en esta sección crítica del banco.

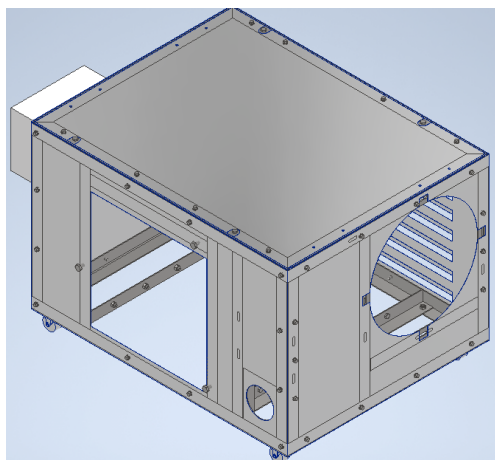


Figura 32. Visualización de las tapas cubriendo la estructura.

Fuente: Elaboración propia en Inventor

Las tapas de la estructura desempeñan funciones clave dentro del diseño del banco de carga resistivo. En primer lugar, protegen los sistemas eléctricos y mecánicos de agentes externos, como polvo, humedad y golpes accidentales, lo que contribuye a la durabilidad de los componentes internos. Además, facilitan el control del flujo de aire al dirigir el calor generado por las resistencias hacia la rejilla de escape o el suelo, optimizando la disipación térmica del sistema. Por último, mejoran la apariencia general del banco, proporcionando un acabado limpio y seguro que previene el acceso directo a las resistencias y otros elementos eléctricos.

Para facilitar el mantenimiento, las tapas están fijadas a la estructura mediante tornillos de lenteja autoperforantes, lo que permite su desmontaje de manera sencilla y eficiente, sin necesidad de perforaciones adicionales durante la instalación.

Características del diseño

Resistencia y Estabilidad: Diseñada para soportar vibraciones y esfuerzos dinámicos generados durante el funcionamiento del banco. Su construcción robusta asegura la integridad del equipo y la durabilidad de los componentes.

Portabilidad: Incluye cuatro ruedas giratorias con placa y freno, capaces de soportar hasta 50 kg cada una. Estas ruedas permiten un movimiento sencillo y seguro del banco, mientras los frenos garantizan estabilidad durante su operación.

Compactación y Ergonomía: El tamaño reducido del banco facilita su uso en espacios limitados, mientras que la disposición de los componentes asegura un acceso cómodo para mantenimiento y operación.

Ventilación Eficiente: Las aberturas estratégicas en la estructura y el diseño de las tapas aseguran un flujo de aire adecuado, mejorando la disipación térmica.

Facilidad de Construcción: El uso de materiales simples y accesibles como el ángulo doblado de acero y las tapas de zinc alum simplificaron la fabricación, reduciendo tanto los costos como el tiempo de construcción.

Aunque el diseño estructural del banco de carga resistivo cumple con los requisitos funcionales y operativos establecidos, no se llevó a cabo un análisis estructural detallado para validar su resistencia máxima bajo condiciones extremas. Esta decisión se consideró adecuada debido a la baja carga generada por los componentes y a la robustez del material seleccionado. Sin embargo, se recomienda realizar simulaciones estructurales en futuros desarrollos para validar y optimizar la capacidad del diseño.

El diseño estructural logra un equilibrio entre funcionalidad y economía, utilizando materiales seleccionados por su resistencia, disponibilidad y bajo costo. La estructura fue concebida para integrar de manera eficiente los sistemas eléctricos y de ventilación, garantizando una adecuada disipación térmica y la seguridad del equipo. Las uniones, realizadas mediante soldadura con electrodo Indura 6011, aseguran robustez y confiabilidad,

mientras que las ruedas giratorias brindan portabilidad y ergonomía, facilitando el uso y el transporte del banco.

Además, las tapas desempeñan un papel fundamental al proteger los componentes internos y al dirigir el flujo de aire, lo que garantiza un funcionamiento eficiente y seguro del sistema. Estas características demuestran que el diseño estructural cumple plenamente con los objetivos del proyecto, proporcionando una base sólida y confiable para las pruebas y aplicaciones previstas.

3.4. Diseño del sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento del banco de carga resistivo está basado en el principio de convección externa forzada en bancos de tubos, una técnica eficiente para disipar el calor generado por las resistencias durante su operación. Este diseño aprovecha el flujo forzado de aire, proporcionado por un ventilador principal y complementado por un extractor, para garantizar una transferencia de calor óptima desde las resistencias hacia el ambiente.

El principal objetivo del sistema es garantizar la disipación térmica necesaria para mantener el equipo operando dentro de un rango de temperaturas seguro, evitando daños en los componentes y maximizando la eficiencia del banco de carga. Además, busca:

- **Optimizar el flujo de aire** a través de las resistencias para maximizar la transferencia de calor por convección.
- **Evitar acumulaciones térmicas** que puedan comprometer el rendimiento del sistema.
- **Asegurar la estabilidad térmica** durante pruebas de carga prolongadas, contribuyendo a la durabilidad de los componentes.

En esta sección se describe el diseño del sistema de enfriamiento, los componentes seleccionados y los fundamentos técnicos que respaldan su implementación, con un enfoque en cumplir los objetivos de funcionalidad, seguridad y eficiencia operativa.

El sistema de enfriamiento del banco de carga resistivo se compone de elementos clave que trabajan en conjunto para garantizar una disipación térmica eficiente. A continuación, se describen los principales componentes:

Ventilador principal

- **Especificaciones:** Ventilador de 12 V DC con una potencia de 90 W.
- **Función:** Es el encargado de generar el flujo de aire primario que atraviesa las resistencias del banco. Este flujo de aire asegura la transferencia de calor desde las resistencias hacia el ambiente, disipando el calor generado por el sistema.
- **Alimentación:** Recibe energía de un adaptador que convierte los 220 V AC de la alimentación principal a 12 V DC.

Extractor

- **Especificaciones:** Extractor de 220 V AC con una potencia de 51 W.
- **Función:** Complementa el flujo de aire generado por el ventilador principal al asegurar la expulsión eficiente del aire caliente fuera del banco. Esto previene la acumulación de calor dentro del sistema y mejora la circulación del aire.
- **Ubicación:** Está posicionado en el lado opuesto en lugar perpendicular al ventilador principal para garantizar un flujo continuo y uniforme.

Disposición física de las resistencias

Las resistencias están organizadas en un banco de tubos con una disposición escalonada, diseñada específicamente para maximizar la interacción entre el flujo de aire y las superficies calientes de las resistencias. Esta configuración optimiza la transferencia de calor, asegurando una disipación térmica eficiente. Además, la disposición escalonada permite un diseño compacto que se adapta a las limitaciones del equipo, combinando funcionalidad y eficiencia en el uso del espacio disponible.

Estos componentes, cuidadosamente seleccionados y posicionados, forman la base del sistema de enfriamiento del banco de carga. Su diseño asegura que el sistema opere de

manera eficiente, disipando el calor generado durante las pruebas de carga y garantizando la estabilidad térmica del equipo.

3.4.1. Principio de funcionamiento de la convección externa forzada en bancos de tubos

La convección externa forzada en bancos de tubos es un proceso térmico en el que un fluido, en este caso el aire, es impulsado a pasar sobre la superficie externa de un conjunto de tubos organizados, facilitando la transferencia de calor entre las superficies de los tubos y el flujo de aire.

En este sistema, el aire es impulsado mediante ventiladores, generando un flujo continuo y controlado sobre las resistencias encapsuladas en los tubos. A medida que el aire circula por la superficie caliente de los tubos, absorbe el calor generado por las resistencias internas y lo disipa hacia el ambiente. Este proceso se basa en el efecto Joule, donde el calor producido por el paso de corriente eléctrica a través de las resistencias es transferido a la superficie de los tubos y posteriormente al flujo de aire mediante convección.

La interacción entre el aire y las superficies calientes maximiza la eficiencia térmica del sistema, asegurando una disipación adecuada del calor generado y manteniendo el equipo dentro de un rango operativo seguro.

Factores que afectan la convección forzada

- **Velocidad del flujo de aire (V):** La eficiencia de la transferencia de calor aumenta con la velocidad del flujo, ya que incrementa el coeficiente de transferencia de calor convectivo (h).
- **Disposición de los tubos(resistencias):** Una disposición escalonada mejora la interacción entre el aire y las superficies calientes, lo que aumenta la eficiencia de la transferencia de calor en comparación con una disposición alineada.
- **Propiedades del fluido:** Parámetros como la viscosidad, densidad, conductividad térmica y número de Prandtl (Pr) del aire afectan directamente el coeficiente de transferencia de calor y la capacidad de disipar energía térmica.

- **Diferencia de temperatura (ΔT):** La cantidad de calor transferido es proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie del tubo y el flujo de aire.

Estos factores no solo influyen en la eficiencia de la transferencia de calor, sino que también determinan el comportamiento del flujo a medida que interactúa con los tubos del banco. Este comportamiento depende del régimen de flujo y de la configuración geométrica de los tubos, como se detalla a continuación

Dinámica del flujo sobre los bancos de tubos

- **Régimen de flujo (laminar o turbulento):** El número de Reynolds (Re_D) es el parámetro que determina si el flujo es laminar o turbulento. En el flujo laminar, las capas del fluido se deslizan suavemente unas sobre otras, con una transferencia de calor limitada debido a la menor interacción entre las capas de fluido. Por otro lado, en el flujo turbulento, el movimiento caótico del fluido intensifica la mezcla entre las capas, aumentando significativamente la transferencia de calor. En bancos de tubos, el régimen del flujo depende de factores como la velocidad del aire, las propiedades térmicas del fluido y la disposición geométrica de los tubos.
- **Velocidad máxima (V_{max}):** A medida que el aire pasa a través de los tubos, se comprime en los espacios reducidos entre ellos, aumentando localmente su velocidad, conocida como V_{max} . Este incremento en la velocidad mejora la transferencia de calor al aumentar la interacción entre el flujo de aire y las superficies calientes de los tubos. La velocidad máxima es un factor crítico para diseñar el sistema de ventilación, ya que afecta directamente el coeficiente de transferencia de calor y, por lo tanto, la eficiencia del sistema.
- **Impacto de la configuración geométrica:** La disposición de los tubos dentro del banco tiene un impacto significativo en la transferencia de calor y las pérdidas de presión. En una disposición escalonada, como la utilizada en este diseño, se fomenta un patrón de flujo más complejo que aumenta la interacción entre el aire y las superficies de los tubos, lo que resulta en una mayor transferencia de calor. Sin embargo, este tipo de configuración también genera mayores pérdidas de presión en comparación con una disposición alineada, donde el flujo de aire se mueve de manera más directa.

Después de comprender los fundamentos de la convección externa forzada y los factores que afectan la dinámica del flujo sobre los bancos de tubos, es necesario realizar cálculos detallados para dimensionar correctamente el sistema de enfriamiento. Estos cálculos permitirán estimar parámetros clave como el número de Reynolds, el número de Nusselt, el coeficiente de transferencia de calor y la velocidad máxima del flujo de aire. Además, estos valores son fundamentales para determinar la capacidad del sistema para disipar el calor generado por las resistencias y garantizar la estabilidad térmica del banco. A continuación, se describen los procedimientos utilizados para calcular estos parámetros y las herramientas aplicadas en el diseño del sistema.

3.4.2. Cálculos para el diseño del sistema de enfriamiento

Antes de realizar los cálculos detallados necesarios para dimensionar el sistema de enfriamiento, es fundamental definir los parámetros físicos del fluido (aire) y los parámetros geométricos del banco de tubos. Estos valores son la base para calcular magnitudes clave, como el número de Reynolds y el coeficiente de transferencia de calor, asegurando que el diseño del sistema sea eficiente y acorde con las condiciones operativas del banco.

I. Parámetros físicos del aire

A continuación, se describen los parámetros físicos del aire a 20 °C, una temperatura representativa de las condiciones ambientales comunes en Valparaíso, bajo una presión atmosférica estándar de 1 atm y una humedad relativa del 75-85 %. Estas propiedades son fundamentales para realizar los cálculos relacionados con la dinámica del flujo y la transferencia de calor en el sistema de enfriamiento, se presentan en la siguiente tabla:

Los parámetros físicos del aire a esta temperatura son :	
Densidad (ρ)	1,204 kg/m ³
Viscosidad Dinámica (μ):	1,825E-05 Pa·s
Calor Específico (c_p):	1006 J/(kg·K)
Conductividad Térmica (k):	0,02551 W/(m·K)
Número de Prandtl (Pr):	0,708 (-)

Tabla 3. Tabla de parámetros físicos del Aire a 20°C, 1atm y una humedad relativa del 75% al 85%

Fuente: Elaboración propia en Excel

II. Parámetros geométricos del banco de tubos

La configuración del banco de tubos es escalonada, diseñada para maximizar la transferencia de calor por convección forzada. Los siguientes parámetros geométricos son fundamentales para calcular el rendimiento térmico y determinar el comportamiento del flujo de aire en el sistema:

- **Diámetro de las resistencias (D):** 0,010 m. Representa el diámetro externo de las resistencias encapsuladas, que actúan como tubos en el sistema.
- **Largo de las resistencias (L):** 0,350 m, Longitud de cada resistencia en la dirección del flujo, determinando la extensión de contacto entre el aire y la superficie caliente.
- **Espaciamiento longitudinal (S_L):** 0,055 m. Distancia entre los centros de dos tubos consecutivos en la dirección del flujo.
- **Espaciamiento transversal (S_T):** 0,080 m. Distancia entre los centros de dos tubos adyacentes en una misma fila transversal.
- **Espaciamiento diagonal (S_D):** 0,068 m Distancia diagonal entre los centros de los tubos en la configuración escalonada.
- **Relación S_T/D :** 8,0. Relación entre el espaciamiento transversal y el diámetro de los tubos, que afecta el patrón de flujo y la eficiencia de la transferencia de calor.
- **Número de resistencias:** 16. Total de resistencias presentes en el banco, agrupadas en una configuración de 3 tubos por plano transversal.
- **Número de tubos en el plano transversal (N_T):** 3 Cantidad de tubos presentes en una única fila transversal.
- **Número de filas longitudinales (N_L):** 6. Total de filas de tubos en la dirección del flujo de aire.
- **Área frontal (A_1):** 0,0193 m². Área total en la sección transversal perpendicular al flujo.
- **Área mínima de flujo (A_T):** 0,0203 m². Área efectiva para el paso del aire en los espacios entre los tubos.
- **Relación de Áreas (A_T/A_1):** 1,0547. Relación que indica la compresión del flujo a medida que pasa por el banco.
- **Área total de transferencia de calor (A_s):** 0,1759 m². Superficie total disponible para la transferencia de calor entre los tubos y el aire.

- **Factor de corrección:** 0,945. Factor empleado para ajustar las correlaciones en función del número de filas de tubos y la configuración geométrica.

Parámetros geométricos de configuración escalonada					
			Numero de tubos en el plano Transversal	3	
Diámetro de las resistencias(D)	0,0100	m	Área Frontal (A _f)	0,0193	m ²
Largo de las Resistencias(L)	0,3500		Área Mínima de Flujo (A _f)	0,0203	m ²
Espaciamiento Longitudinal (S _L)	0,0550	m	Relación de Áreas	1,0547	-
Espaciamiento Transversal (S _T)	0,0800	m	Área diagonal	0,0203	m ²
Espaciamiento Diagonal (S _D)	0,0680	m	Área total de transferencia de calor (A _s)	0,1759	m ²
Numero de Resistencias	16		Número de filas del banco de tubos (NL)	6	
Relación S _T /D	8,0000	(-)	Factor de corrección	0,9450	

Tabla 4. Tabla de Parámetros Geométricos de la configuración escalonada

Fuente: Elaboración propia en Excel

La configuración geométrica del banco de tubos, organizada de forma escalonada, se diseñó para optimizar la interacción entre el flujo de aire y las resistencias. Con un diámetro de 0,010m y un largo de 0,350m, las resistencias se disponen en un total de 16 unidades, agrupadas en 6 filas longitudinales y 3 tubos por fila transversal. Los espaciamientos transversales y longitudinal un patrón de flujo eficiente, maximizando el área de transferencia de calor disponible y minimizando las pérdidas asociadas al flujo comprimido.

III. Temperatura superficial de las resistencias

Antes de proceder con los cálculos del sistema de enfriamiento, es esencial determinar la temperatura superficial de las resistencias. Este valor es fundamental, ya que influye directamente en la transferencia de calor y en la estimación de las propiedades físicas del aire, como el número de Prandtl en la superficie (Pr_s).

Se realizaron mediciones de la temperatura superficial de las resistencias en condiciones operativas, cuyos valores se presentan en la siguiente tabla:

Numero de medición	Temperatura en °C	Numero de medición	Temperatura en °C
1	330	8	340
2	340	9	347
3	337	10	344
4	359	11	349
5	360	12	350
6	371	13	336
7	352		

Nota: Los valores fueron obtenidos utilizando una termocupla DM8891A en condiciones controladas.

Tabla 5. Valores Medidos de Temperatura Superficial de las Resistencias

Fuente: Elaboración propia en Excel

A partir de los valores medidos, se calculó el promedio de la temperatura superficial de las resistencias. Esto permitió asignar un número de Prandtl correspondiente, tomando como referencia las propiedades físicas del aire a dichas temperaturas promedio.

Promedio temperatura superficie resistencia	349,9375	°C
Número de Prandtl del aire en la superficie (Prs):	0,61	

Tabla 6. Valores promedio de la temperatura del aire y numero de Prandtl del aire en la superficie

Fuente: Elaboración propia en Excel

Con los valores previamente determinados, que incluyen los parámetros físicos del aire, los parámetros geométricos del banco de tubos y las temperaturas superficiales de las resistencias, se procede a realizar los cálculos necesarios para el diseño del sistema de enfriamiento.

En este análisis, se han considerado representaciones gráficas para visualizar los resultados, utilizando la velocidad del aire generada por el ventilador principal como variable independiente. Esta elección permite observar cómo las diferentes variables dependientes, como el número de Reynolds, el coeficiente de transferencia de calor y la transferencia total de calor, varían en función de la velocidad del flujo.

IV. Grafica de comportamiento de la velocidad máxima en función de velocidad del aire generada por el ventilador.

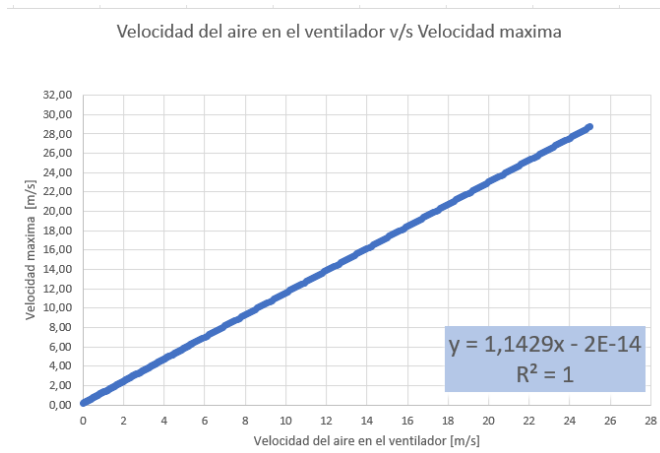


Figura 33. Relación entre la Velocidad del Aire en el Ventilador y la Velocidad Máxima en el Banco de Tubos

Fuente: Elaboración propia en Excel

El gráfico que relaciona la velocidad del aire en el ventilador con la velocidad máxima en el banco de tubos tiene implicancias directas en la transferencia de calor y en el diseño del sistema de ventilación.

En primer lugar, un aumento en la velocidad del ventilador genera un incremento proporcional en la velocidad máxima (V_{max}), lo que intensifica la transferencia de calor. Esto se debe a que un flujo más rápido mejora la interacción entre el aire y las superficies calientes del banco, incrementando el coeficiente de transferencia de calor (h). Este comportamiento asegura que el sistema pueda disipar eficientemente el calor generado por las resistencias, incluso bajo condiciones de operación exigentes.

En segundo lugar, la relación lineal observada valida el diseño del sistema de ventilación, donde la geometría del banco de tubos, en configuración escalonada, contribuye a la aceleración del flujo a través de los tubos. Esta disposición no solo garantiza una mayor velocidad del flujo en las áreas críticas, sino que también confirma que el ventilador principal cumple con los requisitos del sistema. Además, el extractor juega un rol complementario, asegurando que no se generen restricciones que puedan comprometer el rendimiento del flujo de aire.

V. Grafica de comportamiento de el número de Reynolds en función de velocidad del aire generada por el ventilador.

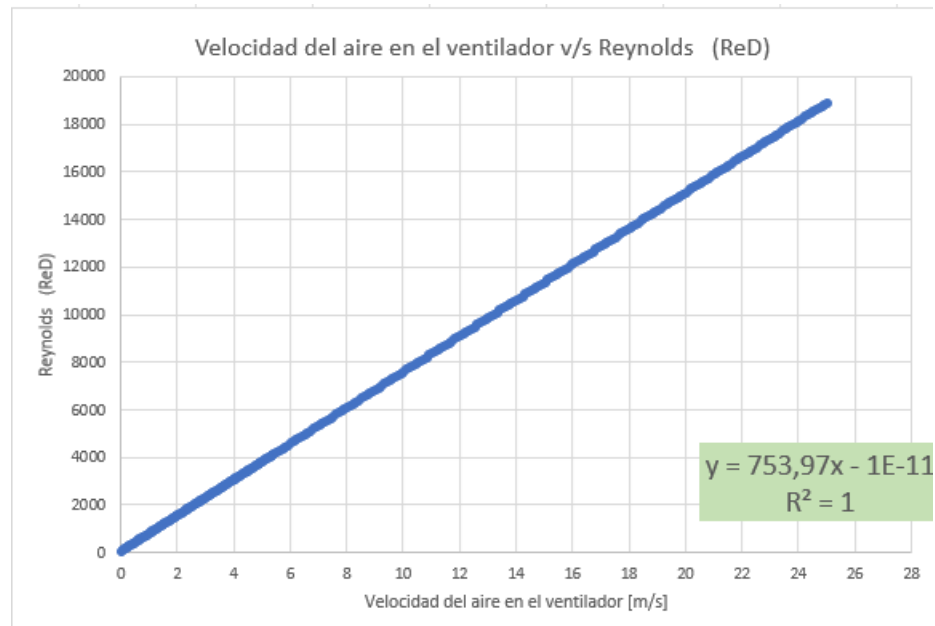


Figura 34. Relación entre la Velocidad del Aire en el Ventilador y El número de Reynolds.

Fuente: Elaboración propia en Exel

El gráfico presentado muestra una relación lineal entre la velocidad del aire generada por el ventilador y el número de Reynolds (ReD) en el banco de tubos, lo que es fundamental para comprender el comportamiento del flujo en el sistema de enfriamiento por convección forzada. Esta relación directa indica que, a medida que la velocidad del flujo aumenta, el régimen del flujo se modifica proporcionalmente, favoreciendo condiciones de flujo turbulento. Esto es esencial para maximizar la transferencia de calor, ya que el régimen turbulento incrementa la interacción entre el flujo de aire y las superficies calientes de los tubos. Además, este comportamiento asegura que el sistema de ventilación esté alineado con los requerimientos térmicos del diseño del banco de carga resistivo, validando su capacidad para disipar el calor generado de manera eficiente.

VI. Grafica de comportamiento del número de Nusselt en función de velocidad del aire generada por el ventilador.

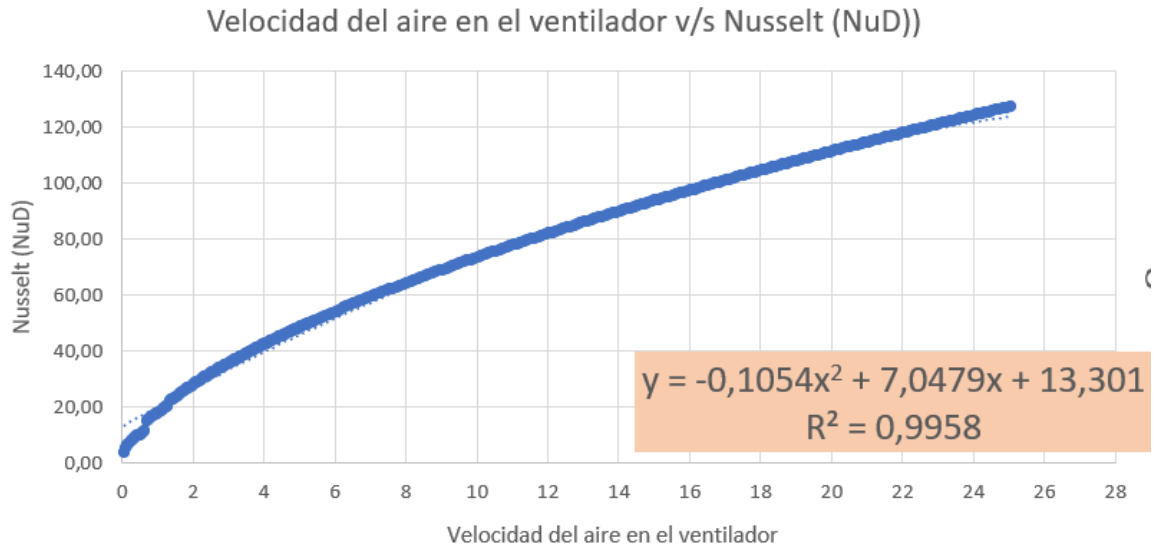


Figura 35. Relación entre la Velocidad del Aire en el Ventilador y El número de Nusselt

Fuente: Elaboración propia en Excel

El gráfico presentado muestra cómo el número de Nusselt, que representa la capacidad de transferencia de calor por convección en el sistema, varía en función de la velocidad del aire en el ventilador. Este grafico refleja que, a medida que aumenta la velocidad del flujo, el número de Nusselt también crece, lo que implica una mejora en el coeficiente de transferencia de calor (h) y, por ende, en la eficiencia térmica del sistema. Sin embargo, a velocidades más altas, el crecimiento de Nu_D se vuelve más moderado, indicando un punto de optimización en el diseño. Este comportamiento valida que el sistema de ventilación está correctamente diseñado para maximizar la disipación de calor en el banco de tubos, asegurando una operación eficiente bajo las condiciones esperadas.

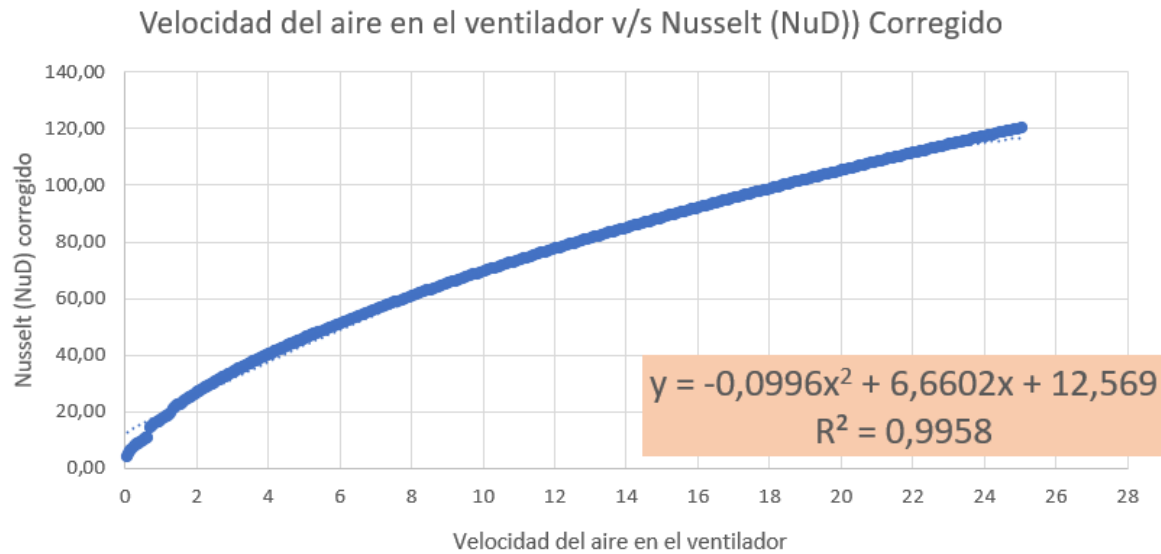


Figura 36. Relación entre la Velocidad del Aire en el Ventilador y El número de Nusselt corregido

Fuente: Elaboración propia en Exel

Con la obtención del valor del número de Nusselt se procede a multiplicar por un factor de corrección el cual está indicado en los parámetros geométricos antes mencionados obteniéndose la gráfica anterior.

VII. Grafica de comportamiento del coeficiente de transferencia de calor en función de velocidad del aire generada por el ventilador.

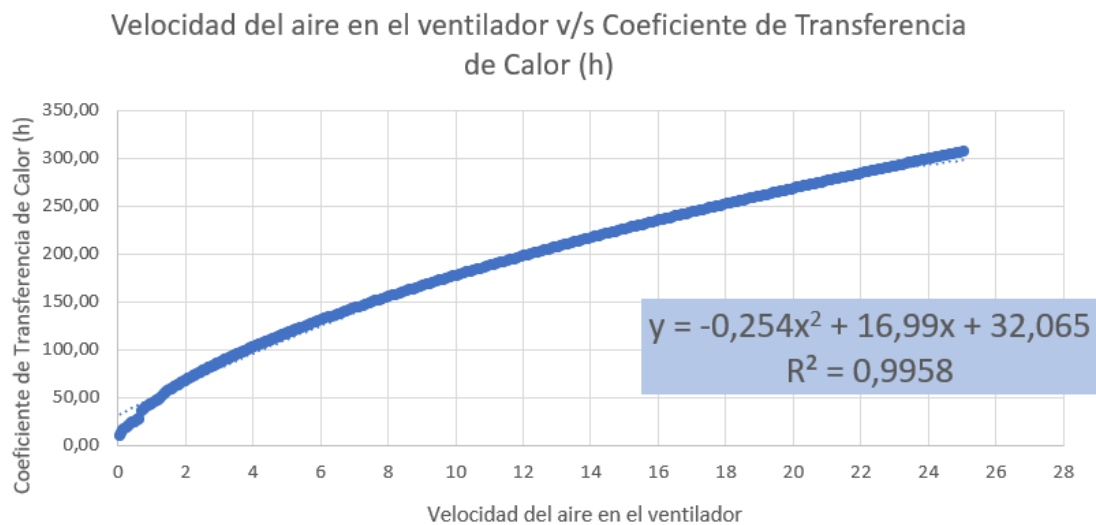


Figura 37. Relación entre la Velocidad del Aire en el Ventilador y El coeficiente de transferencia de calor

Fuente: Elaboración propia en Exel

El gráfico muestra una relación cuadrática entre la velocidad del aire en el ventilador y el coeficiente de transferencia de calor (h). A medida que la velocidad del flujo de aire aumenta, también lo hace el coeficiente de transferencia de calor, lo que indica una mayor capacidad del sistema para disipar el calor generado por las resistencias. Sin embargo, el crecimiento se vuelve más moderado a velocidades mayores, mostrando un comportamiento típico de optimización en sistemas de enfriamiento. Esto asegura que el diseño permita un desempeño térmico eficiente, maximizando la transferencia de calor al flujo de aire y garantizando la disipación adecuada del calor bajo diversas condiciones operativas.

VII. Grafica de comportamiento del flujo volumétrico en función de velocidad del aire generada por el ventilador.

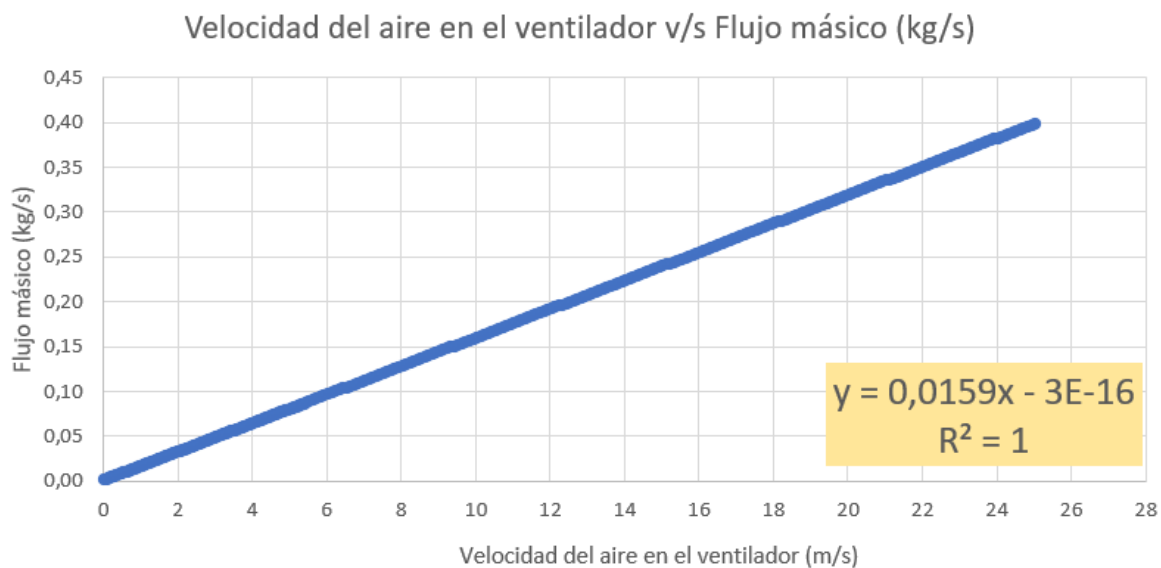


Figura 38. Relación entre la Velocidad del Aire en el Ventilador y El flujo másico

Fuente: Elaboración propia en Excel

El gráfico muestra la relación entre la velocidad del aire generada por el ventilador y el flujo másico del aire en el sistema de enfriamiento. A medida que aumenta la velocidad del flujo, el flujo másico crece de manera proporcional. Este comportamiento indica que el ventilador es capaz de manejar un incremento lineal en la cantidad de aire que circula a través del sistema, lo que es fundamental para garantizar una transferencia de calor eficiente en el banco de tubos.

La relación directa también refleja la capacidad del sistema para ajustar el enfriamiento en función de la velocidad del ventilador, permitiendo optimizar la disipación térmica según las condiciones de operación. Esto asegura que el flujo de aire requerido para mantener las resistencias en un rango térmico seguro sea alcanzado de manera eficiente.

VIII. Grafica de comportamiento de la temperatura del aire a la salida del banco en función de velocidad del aire generada por el ventilador.

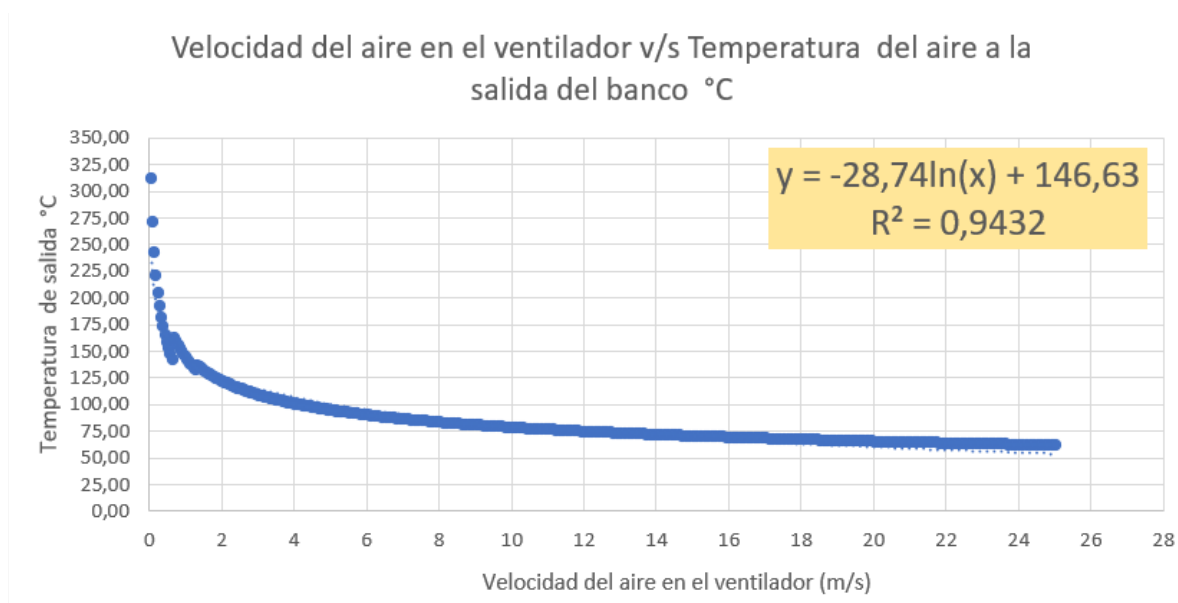


Figura 39. Relación entre la Velocidad del Aire en el Ventilador y la Temperatura del aire a la salida del banco

Fuente: Elaboración propia en Excel

El gráfico muestra la relación entre la velocidad del aire en el ventilador y la temperatura del aire a la salida del banco. A medida que aumenta la velocidad del aire, la temperatura del aire de salida disminuye de manera significativa al principio y luego tiende a estabilizarse. Este comportamiento indica que velocidades de flujo más altas permiten una mayor disipación de calor desde las resistencias hacia el flujo de aire, lo que reduce la temperatura del aire de salida.

La tendencia refleja la eficiencia del sistema de ventilación para mantener temperaturas controladas en el banco, asegurando que el calor generado por las resistencias sea transferido de manera efectiva al aire y disipado al ambiente. Este patrón también sugiere que el sistema

logra un equilibrio térmico eficiente a velocidades mayores, donde la capacidad de enfriamiento alcanza un rendimiento constante.

IX. Grafica de comportamiento de la transferencia total de calor en función de velocidad del aire generada por el ventilador.

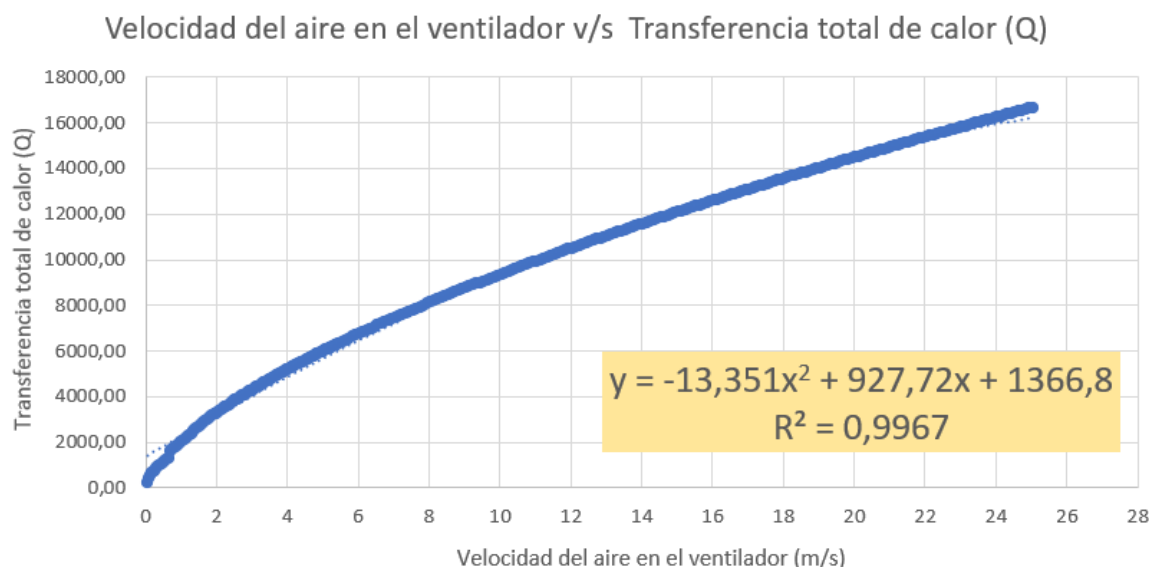


Figura 40. Relación entre la Velocidad del Aire en el Ventilador y la Transferencia total de calor

Fuente: Elaboración propia en Excel

El gráfico muestra la relación entre la velocidad del aire en el ventilador y la transferencia total de calor (Q) en el sistema. A medida que la velocidad del flujo aumenta, la cantidad de calor transferido también se incrementa, siguiendo una tendencia cuadrática. Este comportamiento refleja cómo el incremento en la velocidad del aire mejora la eficiencia de la transferencia de calor al permitir una mayor interacción entre el flujo de aire y las superficies calientes del banco.

La tendencia indica que el sistema de ventilación es efectivo para manejar mayores demandas de enfriamiento, logrando disipar más calor generado por las resistencias a medida que aumenta la velocidad del ventilador. Además, este comportamiento valida la capacidad del sistema de enfriamiento para mantener la temperatura de las resistencias bajo control, incluso en condiciones de carga elevada. Este análisis destaca la importancia de optimizar la velocidad del flujo de aire para maximizar la eficiencia térmica del banco.

X. Selección del ventilador para el sistema de enfriamiento

La selección del ventilador para el sistema de enfriamiento se realizó tras un análisis detallado de las gráficas presentadas, las cuales demostraron la relación entre la velocidad del aire, la transferencia de calor y la eficiencia térmica del sistema. Este análisis permitió identificar los requerimientos técnicos necesarios para que el sistema de ventilación cumpliera con los objetivos de diseño.

Se seleccionó un ventilador de 14 pulgadas con una potencia de 90 W y una alimentación de 12 V, capaz de generar un flujo de aire de 900 metros cúbicos por hora. Esta elección responde tanto a las necesidades técnicas del banco de carga como a las limitaciones económicas y de disponibilidad en el mercado.

Adicionalmente, se realizaron mediciones del ventilador seleccionado para determinar la velocidad del aire a la salida del dispositivo, obteniéndose valores en el rango de 10 m/s a 11.2 m/s. Estos resultados son consistentes con los requerimientos establecidos en el diseño del sistema de enfriamiento y aseguran un rendimiento adecuado para la disipación de calor en el banco de tubos.

La elección de este ventilador garantiza un equilibrio entre eficiencia, costo y disponibilidad, consolidando su viabilidad dentro del diseño general del sistema de enfriamiento.

Velocidad de salida del ventilador [m/s]	Velocidad max [m/s]	Reynolds (ReD)	Nusselt (NuD)	Nusselt (NuD) Corregido	Coefficiente de Transferencia de Calor (h) [W/m ² ·K]	Flujo másico [kg/s]	Temperatura del aire a la salida del banco [°C]	Delta de temperatura media logarítmica (ΔT _m)	Razón de transferencia de calor [W]
10	11,429	7540	73,319	69,286	176,749	0,1589	78,315	299,836	9323,477
10,1	11,543	7615	73,758	69,701	177,807	0,1605	78,105	299,948	9382,813
10,2	11,657	7691	74,195	70,114	178,862	0,1621	77,898	300,058	9441,923
10,3	11,771	7766	74,631	70,526	179,912	0,1637	77,693	300,167	9500,810
10,4	11,886	7841	75,065	70,936	180,958	0,1653	77,491	300,275	9559,478
10,5	12,000	7917	75,497	71,344	182,000	0,1669	77,292	300,381	9617,928
10,6	12,114	7992	75,927	71,751	183,038	0,1685	77,095	300,486	9676,164

10,7	12,229	8068	76,356	72,157	184,072	0,1701	76,901	300,590	9734,189
10,8	12,343	8143	76,784	72,561	185,102	0,1716	76,709	300,692	9792,005
10,9	12,457	8218	77,209	72,963	186,128	0,1732	76,519	300,794	9849,615
11	12,571	8294	77,634	73,364	187,151	0,1748	76,332	300,893	9907,021
11,1	12,686	8369	78,056	73,763	188,170	0,1764	76,146	300,992	9964,226
11,2	12,800	8444	78,478	74,161	189,185	0,1780	75,963	301,089	10021,233

Tabla 7. Tabla de los parámetros clave obtenidos para el rango de trabajo del ventilador seleccionado.

Fuente: Elaboración propia en Excel

Esta tabla resume los parámetros clave obtenidos para el rango de trabajo del ventilador seleccionado. Incluye valores como la velocidad máxima del aire (V_{max}), el número de Reynolds (ReD), el número de Nusselt (NuD y su corrección), el coeficiente de transferencia de calor (h), el flujo másico (kg/s), la temperatura de salida del aire del banco ($^{\circ}C$), la diferencia de temperatura media logarítmica (ΔT_m) y la transferencia total de calor (Q).

Estos datos permiten evaluar el desempeño del sistema de enfriamiento bajo condiciones operativas reales y verificar si cumple con los objetivos del diseño. En particular, la tabla refleja cómo los parámetros térmicos y de flujo varían con la velocidad de salida del ventilador, proporcionando una visión integral del comportamiento del sistema en el rango de velocidades de trabajo del ventilador seleccionado.

Aunque el ventilador cumple con los requisitos de transferencia de calor total o razón de transferencia de calor, se observa que la temperatura del aire a la salida del banco permanece elevada, variando entre $78,315^{\circ}C$ y $75,935^{\circ}C$. Esto sugiere la necesidad de apoyo adicional por parte del extractor, cuyo propósito será remover una mayor cantidad de aire caliente del interior del equipo. Este ajuste permitirá mejorar la eficiencia del sistema de enfriamiento, reduciendo las temperaturas internas del banco y asegurando un mejor control térmico durante el funcionamiento del equipo.

3.5. Conclusión del diseño del Banco de carga

El diseño del banco de carga resistivo se desarrolló de manera integral, considerando los aspectos conceptuales, eléctricos, estructurales y del sistema de enfriamiento. Cada una de las decisiones tomadas respondió a objetivos específicos relacionados con funcionalidad, seguridad, eficiencia y viabilidad económica, lo que permitió la creación de un equipo compacto y adaptable a las necesidades del proyecto.

El sistema eléctrico fue configurado para operar de manera segura bajo una alimentación monofásica de 220 V, integrando protecciones, controles modulares y sistemas de medición que facilitan su operación. Por su parte, el diseño estructural brindó una solución robusta y económica, capaz de soportar las cargas involucradas, mientras que el sistema de enfriamiento se dimensionó para garantizar una disipación eficiente del calor generado por las resistencias, con el apoyo de un extractor para optimizar el flujo de aire interno.

Durante el proceso de diseño, se intentó realizar una simulación del sistema de enfriamiento en ANSYS para validar los cálculos obtenidos. Sin embargo, los resultados de la simulación no coincidieron con los valores calculados previamente, lo que impidió su integración como herramienta de validación. A pesar de esta dificultad, los resultados obtenidos mediante los métodos analíticos proporcionaron una base sólida para el diseño y dimensionamiento del sistema de enfriamiento.

Si bien se enfrentaron algunas limitaciones, como la ausencia de un análisis estructural detallado y la necesidad de complementar la disipación térmica con un extractor, el diseño cumple con los objetivos establecidos para el proyecto. Las decisiones se fundamentaron en análisis técnicos rigurosos y en el uso de herramientas como hojas de cálculo para cálculos avanzados, asegurando la confiabilidad y efectividad del banco de carga resistivo.

En el siguiente capítulo se abordará la construcción del banco, donde se detalla la implementación práctica de este diseño y los desafíos encontrados durante su ensamblaje.

CAPITULO 4. Construcción del Banco de Carga Resistivo

La construcción del banco de carga resistivo marca la etapa en la que las ideas y diseños conceptualizados se materializan en un equipo funcional. Este proceso implicó la transformación de materiales en componentes estructurales, eléctricos y de enfriamiento, que en conjunto dieron vida a un sistema robusto, eficiente y seguro.

El enfoque principal del proceso fue garantizar que la fabricación reflejara fielmente los cálculos y diseños establecidos en los capítulos anteriores. Para ello, se seleccionaron herramientas y materiales adecuados, siguiendo prácticas de seguridad y estándares técnicos. La construcción combinó soldadura, ensamblaje eléctrico, montaje de ventilación y pintura, culminando en un banco de carga funcional que responde a los objetivos del proyecto.

En este capítulo se describen las etapas de fabricación, las herramientas y materiales empleados, y los desafíos enfrentados durante la construcción. Este análisis busca proporcionar una visión integral del proceso y demostrar cómo cada etapa contribuyó al resultado final del banco de carga resistivo.

4.1. Herramientas utilizadas en la construcción

La construcción del banco de carga resistivo se realizó utilizando una combinación de herramientas manuales y eléctricas, disponibles en el laboratorio de termofluidos. Estas herramientas fueron esenciales para garantizar un ensamblaje preciso, seguro y funcional del equipo, cumpliendo con los requisitos técnicos y estructurales establecidos.

I. Para la estructura de acero

Se emplearon diversas herramientas específicas para preparar, cortar, ensamblar y soldar los perfiles y planchas de acero estructural:

- Esmeril Angular: Utilizado para cortar y desbastar los perfiles de acero, facilitando la preparación de las piezas.
- Soldadora eléctrica: Se utilizó para unir los ángulos de acero mediante soldaduras con electrodo 6011, asegurando una estructura sólida y resistente.
- Taladro con brocas para acero: Para perforar agujeros en la estructura, necesarios para el montaje de componentes como ruedas y ventiladores.

- Sierra caladora con hojas para acero: Herramienta clave para realizar cortes precisos en las planchas y en lugares donde el esmeril no era adecuado.
- Cinta métrica y escuadra: Para medir y marcar las dimensiones con precisión antes del corte o ensamblaje.
- Martillo: Usado para emparejar las piezas durante el ensamblaje y garantizar su correcta alineación.
- Sargentos o prensas: Para sujetar firmemente las piezas mientras se realizaba la soldadura o el ensamblaje.
- Nivel de burbuja: Utilizado para verificar la alineación de la estructura y asegurar su estabilidad.

II. Para el Sistema Eléctrico

Las herramientas utilizadas en la instalación del sistema eléctrico permitieron realizar conexiones seguras y precisas:

- Pelacables: Para remover el aislamiento de los cables y preparar las conexiones.
- Pinzas de punta y de presión: Para sujetar, ajustar y realizar conexiones con mayor precisión.
- Destornilladores (planos y de cruz): Empleados en la instalación de los switches, interruptores y conexiones eléctricas.
- Multímetro: Para verificar la continuidad de los circuitos, comprobar las conexiones y asegurar el correcto funcionamiento del sistema.
- Alicates de corte: Para cortar los cables a las dimensiones necesarias.
- Llaves ajustables y fijas: Utilizadas para montar elementos como el ventilador, el extractor y las ruedas.

III. Para el Acabado Final

- Brocha: Se utilizó para aplicar la pintura protectora en la estructura, previniendo la corrosión y mejorando el acabado estético.

IV. Equipo de Protección Personal (EPP)

Para garantizar la seguridad durante todo el proceso de construcción, se emplearon:

- Guantes de Seguridad: Para proteger las manos durante tareas de corte, soldadura y manipulación de piezas.
- Gafas de Seguridad: Para proteger los ojos de chispas, partículas y esquirlas durante el corte y la soldadura.
- Zapatos de Seguridad: Para prevenir accidentes en los pies debido a herramientas pesadas o piezas metálicas caídas.

El uso adecuado de estas herramientas permitió llevar a cabo cada etapa de la construcción del banco de carga resistivo de manera eficiente y segura, asegurando la calidad y funcionalidad del equipo terminado.

4.2. Materiales empleados

En la construcción del banco de carga resistivo, se utilizaron materiales cuidadosamente seleccionados para cumplir con los requisitos de resistencia estructural, funcionalidad eléctrica y durabilidad. A continuación, se detallan los principales materiales empleados y su función dentro del diseño:

1. **Acero estructural:** El material seleccionado para la estructura principal del banco es acero en ángulos doblados de dimensiones 30 mm x 30 mm x 2 mm. Este componente tiene como función principal proporcionar soporte a los elementos eléctricos y mecánicos del banco, además de garantizar la estabilidad durante su operación. La elección de este material se basa en sus características destacadas, como su alta resistencia mecánica, facilidad de manipulación durante el proceso de fabricación y su bajo costo, lo que lo convierte en una opción eficiente y económica para este tipo de aplicación.
2. **Planchas de acero:** Para la construcción del banco se utilizaron planchas de acero con diferentes espesores según su función específica. Las placas destinadas a soportar las resistencias están fabricadas con planchas de acero de 0.5 mm de espesor, diseñadas

para fijar de manera segura estos componentes. Por otro lado, el panel de control, que alberga los switches, indicadores LED y las protecciones eléctricas, fue fabricado con planchas de acero de 1 mm de espesor.

Estas planchas cumplen una función clave al proporcionar la rigidez estructural necesaria para soportar tanto las resistencias como los dispositivos del sistema eléctrico, asegurando además una superficie estable, segura y funcional para la operación del banco.

- III. **Planchas de Zinc-Alum:** El material seleccionado para las tapas del equipo son planchas de zinc-alum de 0.35 mm de espesor. Estas tapas cumplen la función de proteger los componentes internos del banco contra posibles daños externos, como golpes, polvo o humedad, asegurando así su durabilidad y correcto funcionamiento. Además, contribuyen a mejorar la estética del equipo, otorgándole un acabado más profesional y atractivo.
- IV. **Pintura anticorrosiva:** Para proteger la estructura y las planchas del banco, se utilizó pintura negra anticorrosiva como recubrimiento. Este material tiene la función de prevenir la corrosión, especialmente en las condiciones de alta humedad presentes en el ambiente del laboratorio, garantizando así una mayor durabilidad y vida útil de los componentes. Además de su función protectora, este recubrimiento proporciona un acabado uniforme y profesional al equipo.
- V. **Resistencias de cuarzo:** Las resistencias utilizadas en el banco son de cuarzo, con una potencia nominal de 400 W, diseñadas para operar a 220 V y con un rango resistivo de 120 a 130 Ω . Su función principal es generar calor mediante el efecto Joule, cumpliendo el propósito de simular una carga eléctrica resistiva en el sistema. Estas resistencias están configuradas en paralelo, lo que permite reducir la corriente total del sistema y facilita el control de la carga durante su operación.

- VI. Cables eléctricos:** Para las conexiones eléctricas del banco se seleccionaron dos tipos de cables en función de la carga y la seguridad requerida. El cable THHN 10 AWG se empleó en las conexiones principales de alta carga, como el tramo entre el conector de alimentación y las protecciones diferenciales. Por otro lado, el cable libre de halógenos 2.5 mm² H07Z1-K se utilizó en los circuitos de baja carga, como las conexiones a las resistencias y a los LED pilotos. Ambos cables fueron elegidos por su capacidad para garantizar una transmisión segura de energía eléctrica, considerando la corriente requerida en cada aplicación y su disponibilidad en el mercado, asegurando así la confiabilidad y eficiencia del sistema eléctrico.
- VII. Ventilador y extractor:** El sistema de ventilación del banco está compuesto por un ventilador de 14 pulgadas, con especificaciones de 90 W, 12 V y un flujo de aire de 900 m³/h, y un extractor de 220 V y 51 W, que actúa como apoyo en la disipación del calor generado. Ambos componentes cumplen la función de garantizar la circulación de aire necesaria para enfriar las resistencias y mantener el sistema dentro de un rango de operación seguro, evitando sobrecalentamientos y asegurando su funcionamiento óptimo.
- VIII. Conector principal:** El banco cuenta con una hembra embutida IP44 con especificaciones de 32 A y 220 V, diseñada para proporcionar una conexión segura al sistema eléctrico monofásico disponible. Este componente cumple con los requisitos de capacidad y seguridad necesarios, garantizando una operación confiable y protegiendo el sistema de posibles fallos eléctricos.
- IX. Ruedas:** El banco está equipado con ruedas de PVC con freno, diseñadas específicamente para soportar el peso total de la estructura. Estas ruedas cumplen una doble función: facilitan la movilidad del banco dentro del laboratorio y garantizan su estabilidad al momento de la operación, gracias al sistema de frenado que evita desplazamientos no deseados.

Los materiales seleccionados para la construcción del banco fueron elegidos en función de su funcionalidad, costo y disponibilidad. Cada componente cumple un rol esencial en el diseño, asegurando la resistencia estructural, la eficiencia térmica y eléctrica, así como la protección y estética del equipo. La incorporación de recubrimientos anticorrosivos garantiza una mayor durabilidad y resistencia a las condiciones ambientales del laboratorio.

4.3. Etapas de construcción

I. Construcción de la estructura base

La construcción comenzó con la preparación de la estructura principal del banco, utilizando ángulos de acero estructural de 30 mm x 30 mm x 2 mm.

- **Corte de los ángulos:** Los ángulos de acero fueron cortados a las dimensiones requeridas utilizando únicamente un esmeril angular, asegurando precisión y uniformidad en cada pieza.



Figura 41. Corte de perfil metálico utilizando una esmeriladora angular

Fuente: Foto tomada por el autor

- **Formación de cuadros:** Se ensamblaron cuadros básicos utilizando los cortes realizados. Estos cuadros formaron la base y los laterales de la estructura.

- **Soldadura de cuadros:** Los cuadros se soldaron entre sí utilizando un electrodo 6011, conocido por su versatilidad y su capacidad de realizar uniones fuertes en diferentes posiciones. Esta soldadura garantizó la rigidez y estabilidad de la estructura.



Figura 42. Cuadro soldado utilizando perfiles metálicos.

Fuente: Foto tomada por el autor

- **Unión de los cuadros:** Para dar forma a la estructura básica, se añadieron cortes adicionales de ángulos, los cuales fueron soldados para conectar los cuadros. Esta etapa dio lugar a una estructura robusta y uniforme.



Figura 43. Estructura base soldada utilizando perfiles metálicos.

Fuente: Foto tomada por el autor

II. Soldadura de soportes adicionales

Una vez formada la estructura básica, se añadieron soportes adicionales para integrar los diferentes componentes del banco:

- **Soportes para el ventilador y el extractor:** Se soldaron cortes específicos de los ángulos de acero en posiciones estratégicas para montar el ventilador principal y el extractor de aire. Estos soportes garantizaron una instalación estable y alineada.
- **Soportes para las placas de resistencias:** Se añadieron más ángulos a la estructura, formando las bases que soportarían las placas metálicas donde irían montadas las resistencias de cuarzo. Esto permitió una distribución uniforme de las resistencias en el interior del banco.



Figura 44. Estructura del banco ya completada, realizando revisión de diagonales.

Fuente: Foto tomada por el autor

Estas primeras etapas sentaron la base estructural del banco, asegurando que fuera lo suficientemente sólida como para soportar los componentes eléctricos y mecánicos del diseño.

III. Perforaciones para la instalación de componentes

Con la estructura básica y los soportes adicionales ya soldados, se procedió a realizar las perforaciones necesarias para la instalación de los componentes:

- **Ventilador y extractor:** Se utilizaron taladros con brocas para acero para realizar las perforaciones en los soportes previamente soldados. Estas perforaciones permitieron la correcta fijación del ventilador principal y el extractor, asegurando una instalación estable y funcional.
- **Ruedas:** En las esquinas inferiores de la estructura, se realizaron perforaciones para montar las ruedas giratorias. Estas ruedas, equipadas con frenos, facilitarán el desplazamiento del banco de carga y su fijación en una posición estable durante las pruebas.

IV. Aplicación de pintura anticorrosiva en estructura

Antes de proceder con el montaje de los componentes eléctricos y mecánicos, la estructura fue tratada para garantizar su durabilidad y resistencia a la corrosión:

- Se aplicó una capa de pintura anticorrosiva negra utilizando brochas para cubrir completamente la superficie de la estructura.
- Este tratamiento no solo protege al acero de la oxidación, especialmente en ambientes húmedos, sino que también mejora la apariencia estética del banco.



Figura 45. Estructura del banco ya pintada con ventilador, extractor y ruedas instalados.

Fuente: Foto tomada por el autor

Esta etapa aseguró que la estructura estuviera lista y protegida para las siguientes fases de construcción, además de proporcionar una base adecuada para el ensamblaje de los sistemas eléctricos y de enfriamiento.

V. Corte de planchas para recubrimiento y soportes

Con la estructura lista, se procedió a cortar y preparar las planchas que cubrirían el banco y soportarían los componentes internos:

- **Planchas de Zinc Alum (0,35 mm):** Para la construcción del banco se utilizó una lámina de zinc-alum lisa con dimensiones de 1000 mm x 3000 mm x 0,35 mm, la cual fue cortada en el laboratorio de taller mecánico empleando una guillotina. De esta lámina se obtuvieron varias piezas específicas: una plancha de 700 mm x 550 mm para la cubierta superior, dos planchas de 440 mm x 550 mm para los laterales, dos planchas de 700 mm x 440 mm para el frontal y posterior, y dos planchas de 350 mm x 440 mm destinadas inicialmente para el soporte de las resistencias. Cada pieza fue diseñada y cortada con precisión para cumplir con los requerimientos estructurales y funcionales del banco.
- **Modificaciones por requerimientos técnicos:** Durante el proceso de construcción, se realizaron modificaciones para optimizar el diseño y mejorar la funcionalidad del banco. Las planchas de zinc-alum de 350 mm x 440 mm, originalmente seleccionadas, fueron reemplazadas por planchas del mismo tamaño pero con un espesor mayor de 0,5 mm y fabricadas en acero. Este material, más robusto, fue encontrado en el laboratorio de termofluidos, lo que permitió eliminar costos adicionales. Asimismo, una de las planchas de 440 mm x 550 mm fue sustituida por una plancha de acero de 1 mm de espesor, también proveniente del laboratorio de termofluidos, para proporcionar mayor rigidez y durabilidad en la zona correspondiente. Estas modificaciones contribuyeron a mejorar las prestaciones estructurales del banco sin incrementar los costos del proyecto.

Este paso permitió contar con materiales adaptados tanto para el recubrimiento del banco como para el soporte adecuado de los componentes internos, asegurando un diseño robusto y funcional.

VI. Perforaciones y preparación de planchas

Con las planchas ya cortadas a las dimensiones requeridas, se realizó el proceso de perforación y ajustes necesarios para su instalación y funcionalidad:

- **Fijación de planchas a la estructura:** Se utilizaron lentejas autoperforantes para realizar las perforaciones necesarias tanto en la estructura como en las planchas, facilitando su instalación y asegurando un montaje firme.
- **Cortes específicos en planchas:** Durante el proceso de construcción, se utilizaron herramientas como la sierra caladora para realizar los cortes necesarios en las planchas, permitiendo la instalación de los diferentes componentes del banco. En la plancha frontal, se efectuó un corte para montar el ventilador principal, mientras que en la plancha posterior se realizó un corte para instalar una celosía que facilita la ventilación y asegura una extracción eficiente del aire. Adicionalmente, en la plancha lateral, se realizó un corte específico para la instalación del extractor de aire, garantizando así un flujo adecuado en el sistema de enfriamiento.
- **Preparación del panel de control:** La plancha de acero de 1 mm destinada al panel de control fue sometida a ajustes específicos para la instalación de los dispositivos eléctricos. Utilizando una sierra caladora, se realizaron los agujeros necesarios para los switches y el multímetro. Además, se empleó una broca cónica para efectuar perforaciones de 22 mm, indispensables para la instalación de los indicadores LED. Por último, se realizaron perforaciones más pequeñas para fijar la calota que protege los interruptores diferenciales y automáticos, asegurando así la funcionalidad y seguridad del panel de control.

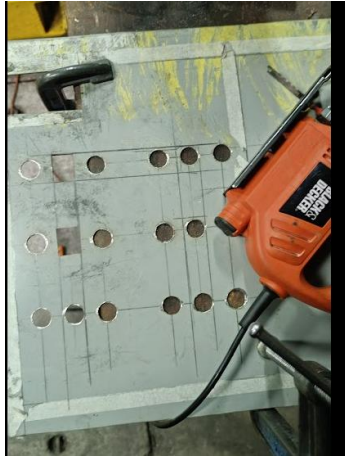


Figura 46. Preparación del Panel de Control, realizando cortes con cierra caladora.

Fuente: Foto tomada por el autor

Este paso aseguró que todas las planchas estuvieran completamente preparadas para albergar los componentes del banco, manteniendo un diseño funcional y un acabado profesional.



Figura 47. Planchas fijadas a la estructura mientras se van realizando los agujeros correspondientes.

Fuente: Foto tomada por el autor

VII. Preparación de las placas de soporte para las resistencias

Con las piezas principales listas, se trabajó en las placas de soporte para las resistencias, las cuales fueron fabricadas a partir de las planchas de acero de 0.5 mm y dimensiones de 350 x 440 mm. El proceso incluyó los siguientes pasos:

- **Perforaciones iniciales:** Se realizaron agujeros de 20 mm de diámetro utilizando una broca cónica, distribuidos estratégicamente para permitir el montaje adecuado de las resistencias.

- **Calados para las Resistencias:** Cada placa recibió calados específicos realizados con una sierra caladora, con dimensiones de 9 mm de ancho por 15 mm de largo, diseñados para que las resistencias descansaran sobre estos cortes, asegurando un montaje firme y funcional.
- **Optimización del Flujo de Aire:** Además de los calados para las resistencias, se añadieron otros agujeros en las placas con el propósito de mejorar el flujo de aire hacia el extractor. Esta modificación busca optimizar la eficiencia del sistema de ventilación, permitiendo una mejor disipación del calor generado por las resistencias.



Figura 48. Preparación de las placas de soporte para las resistencias.

Fuente: Foto tomada por el autor

VIII. Aplicación de pintura anticorrosiva

Con todas las piezas estructurales y funcionales listas, se procedió a la aplicación de una capa de pintura anticorrosiva en cada una de las piezas metálicas, incluyendo las placas y la estructura. Este paso garantiza la protección contra la oxidación, prolongando la vida útil del banco y manteniendo su acabado estético.

Este trabajo minucioso aseguró que cada componente cumpliera con los requisitos técnicos y funcionales del diseño, manteniendo un enfoque en la durabilidad y eficiencia del banco de carga resistivo.



Figura 49. Realización del proceso de aplicación de pintura Anticorrosiva en las planchas

Fuente: Foto tomada por el autor

IX. Instalación de las resistencias y conexión del cableado eléctrico

Instalación de las resistencias

Previo a la conexión del sistema eléctrico, se llevó a cabo la instalación de las resistencias en las placas de soporte. Este proceso consistió en:

- **Fijación de placas de soporte de las resistencias:** Se utilizaron tornillos pernos M6 para asegurar las placas de soporte con resistencias al interior de la estructura del banco.
- **Colocación de las resistencias:** Las resistencias fueron instaladas con precisión en los calados de 9 mm x 15 mm realizados en las placas de soporte, asegurando un ajuste firme que evita movimientos durante la operación. Además, se verificó que cada resistencia estuviera correctamente alineada y orientada, lo que permite un flujo de aire adecuado y optimiza la disipación de calor, garantizando así un rendimiento eficiente y seguro del sistema.

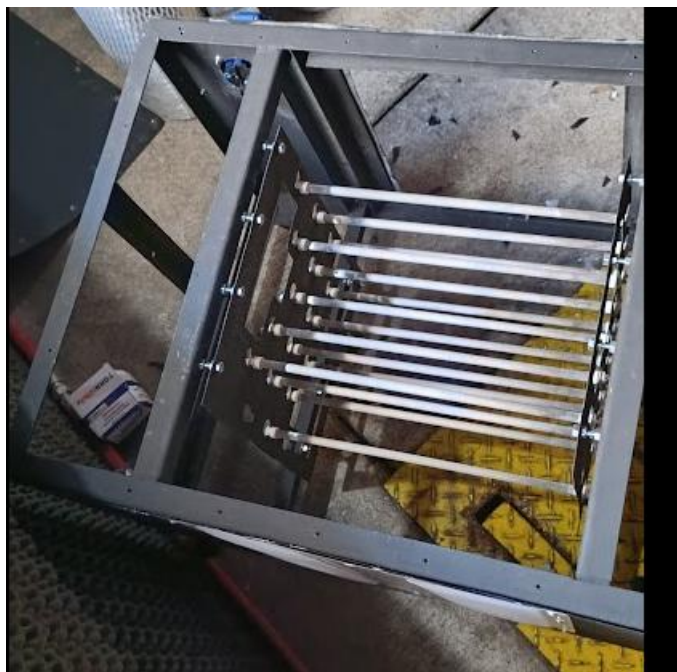


Figura 50. Resistencias instaladas al interior del Banco de Carga Resistivo

Fuente: Foto tomada por el autor

Instalación del cableado eléctrico del panel de control

Con todas las resistencias instaladas, se procedió a la instalación del sistema eléctrico en el panel de control y las conexiones internas del banco. Este proceso incluyó:

- **Montaje de los componentes del panel de control:** Los switches, los indicadores LED y el multímetro digital fueron montados en sus posiciones designadas en la plancha de acero de 1 mm, la cual había sido previamente perforada y pintada para garantizar un acabado limpio y funcional. Asimismo, se instaló la calota protectora, diseñada específicamente para resguardar los interruptores diferenciales y el interruptor automático, asegurando así la seguridad y organización del sistema eléctrico.
- **Conexión de las resistencias al sistema eléctrico:** Cada grupo de resistencias fue conectado a su correspondiente switch en el panel de control, permitiendo un manejo modular y eficiente de las cargas. Las conexiones eléctricas se realizaron utilizando cables libres de halógenos de 2.5 mm² para los circuitos de baja carga y cables THHN

de 10 AWG para las conexiones de mayor carga, asegurando así la seguridad y funcionalidad del sistema.

- **Cableado Principal del Panel:** Los cables principales fueron conectados desde el conector de alimentación hasta las protecciones diferenciales, garantizando un suministro seguro y confiable al sistema. Además, cada switch fue cableado para alimentar los circuitos de resistencias correspondientes, mientras que los LED indicadores se conectaron en paralelo a estos circuitos, proporcionando una señal visual clara de su estado de funcionamiento.
- **Pruebas Iniciales:** Se realizaron pruebas preliminares del sistema eléctrico, incluyendo la verificación de continuidad, el encendido de los LED y las lecturas del multímetro.

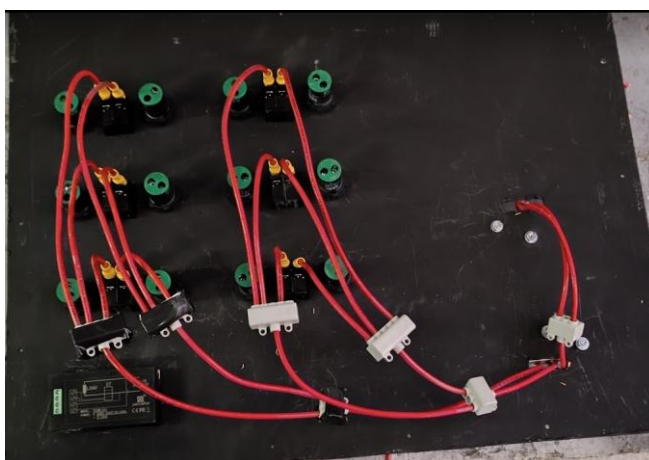


Figura 51. Parte del cableado del Panel de control

Fuente: Foto tomada por el autor

Este proceso permitió integrar correctamente el sistema eléctrico y asegurar que tanto las resistencias como el panel de control funcionaran de manera segura y eficiente dentro del diseño del banco de carga.

X. Cableado interno del banco de carga

Con el panel de control y las resistencias instaladas, se procedió a realizar el cableado interno del banco de carga para conectar todos los componentes eléctricos, asegurando su funcionalidad y seguridad. Este proceso incluyó:

Conexión de las resistencias al panel de control

- Se conectaron los terminales de las resistencias a los circuitos controlados por los switches en el panel.
- Cada grupo de resistencias fue cableado de forma independiente, utilizando cables libres de halógenos de 2.5 mm², para garantizar un manejo seguro de las cargas y minimizar la acumulación de calor en las conexiones.

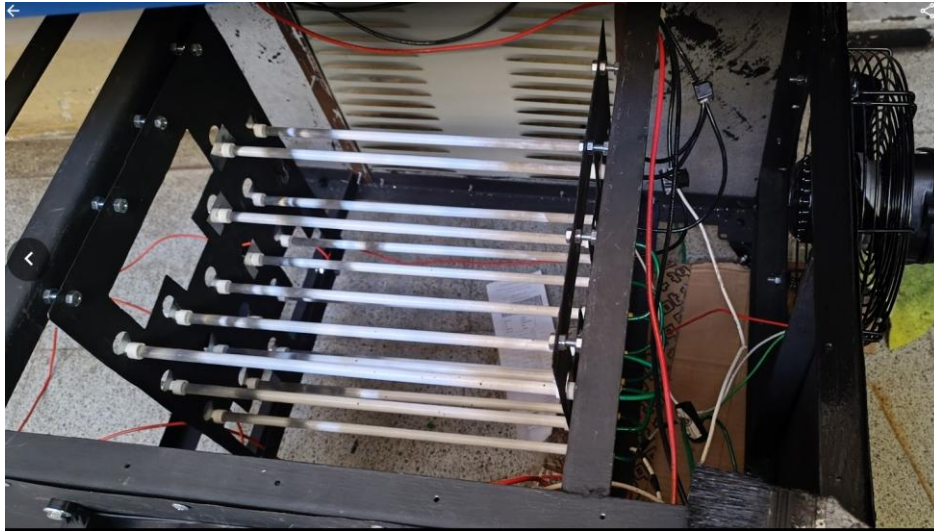


Figura 52. Visualización del cableado interno con las resistencias y el extractor.

Fuente: Foto tomada por el autor

Cableado del sistema de ventilación

- El ventilador principal (12 V, 90 W) fue conectado a su respectiva fuente de alimentación, asegurando una correcta polaridad en las conexiones.
- El extractor (220 V, 51 W) se conectó directamente al sistema eléctrico, utilizando un interruptor dedicado en el panel de control para su activación independiente.

Verificación y pruebas iniciales

- Se realizaron pruebas de continuidad en todas las conexiones internas para verificar la correcta instalación.
- Los circuitos fueron energizados de manera controlada para comprobar el funcionamiento de las resistencias, el ventilador y el extractor, así como la respuesta de los indicadores LED en el panel.

Con el cableado interno completado y validado, el banco de carga resistivo quedó listo para proceder a las pruebas de funcionamiento y validación de diseño. Este paso marcó la

finalización de la construcción del sistema eléctrico interno, integrando todos los componentes en un conjunto funcional y seguro.

XI. Puesta en marcha del equipo

Con la construcción del banco de carga resistivo finalizada, se llevó a cabo una puesta en marcha para verificar el correcto funcionamiento de cada uno de los componentes y asegurar la integridad del sistema. Este proceso incluyó:

Verificación de componentes eléctricos

- Se energizó el sistema y se probó la funcionalidad de los switches del panel de control, verificando que cada grupo de resistencias respondiera correctamente.
- Los indicadores LED se inspeccionaron para confirmar que reflejaran de manera precisa el estado de los circuitos.
- Se monitorearon los medidores eléctricos, comprobando que registraran de manera adecuada los valores de corriente, voltaje, potencia y energía.

Pruebas del sistema de ventilación

- Se verificó la operación del ventilador principal, asegurando que generara el flujo de aire esperado.
- El extractor fue encendido y se comprobó su capacidad para complementar el sistema de ventilación, favoreciendo la disipación del aire caliente al exterior del equipo.



Figura 53. Visualización de la puesta en marcha del Banco de Carga resistivo

Fuente: Foto tomada por el autor

La puesta en marcha permitió validar el funcionamiento integral del banco de carga resistivo, confirmando que cada componente operara según lo previsto en el diseño. Este paso marcó

el cierre del proceso de construcción y dejó el equipo listo para las pruebas de validación y análisis detallado en condiciones reales.

4.4. Desafíos y ajustes durante la construcción

El proceso de construcción del banco de carga resistivo presentó diversos desafíos que requirieron ajustes en los materiales, el diseño y los métodos de fabricación para garantizar la funcionalidad del equipo. A continuación, se detallan los principales desafíos enfrentados y las soluciones implementadas:

I. Reemplazo de materiales por rigidez insuficiente

Durante la instalación de las resistencias, se identificó que las planchas fabricadas en zinc alum de 0.35 mm no ofrecían la rigidez estructural necesaria para soportar adecuadamente las cargas y el calor generado. Como solución, estas fueron reemplazadas por planchas de acero de 0.5 mm disponibles en el laboratorio de termofluidos. Este cambio no solo mejoró la estabilidad del soporte, sino que también incrementó la durabilidad del sistema.

II. Corte de las planchas

El corte de las planchas representó un reto debido a la necesidad de precisión en las dimensiones. Si bien se utilizó una guillotina para cortes iniciales en el taller mecánico, los ajustes más finos y los cortes personalizados, como los de las perforaciones y calados, se realizaron con una sierra caladora. Esto demandó tiempo adicional para asegurar que las piezas encajaran correctamente en la estructura.

III. Modificaciones en el panel de control

Durante la fabricación del panel de control, uno de los principales desafíos encontrados fue trabajar con el material utilizado para su construcción. La plancha de acero de 1 mm de espesor, seleccionada por su rigidez y durabilidad, presentó complicaciones al realizar las perforaciones y cortes necesarios para instalar los componentes eléctricos. En particular, el uso de la sierra caladora para los cortes y la broca cónica para las perforaciones resultó ser un proceso más lento y laborioso de lo anticipado, debido a la dureza y grosor del material.

IV. Instalación de las resistencias

El montaje de las resistencias en sus placas de soporte fue otro desafío. Se tuvieron que realizar calados específicos en las placas de acero para acomodar las resistencias y mejorar

el flujo de aire. Además, se añadieron perforaciones adicionales para optimizar la ventilación en las áreas cercanas al extractor, mejorando así la eficiencia térmica.

V. Ensamble y alineación de la estructura

Durante la construcción de la estructura de acero, surgieron dificultades en la alineación de los marcos soldados. Se utilizaron martillos y prensas para corregir desviaciones y garantizar un ensamblaje preciso. Finalmente, la estructura logró cumplir con los requisitos de estabilidad y soporte definidos en el diseño.

VI. Ajustes en el sistema de ventilación

Durante el desarrollo del sistema de ventilación, se realizaron modificaciones importantes para garantizar un desempeño adecuado en la disipación del calor generado por las resistencias. Inicialmente, se planeaba utilizar un ventilador principal proveniente de un electroventilador de un Citroën CX. Aunque este ventilador funcionaba correctamente bajo cargas de corriente directa (DC), al conectarlo a la red eléctrica mediante la fuente de alimentación, generaba un cortocircuito, lo que imposibilitó su uso en el sistema.

Como solución, se reemplazó este ventilador por el modelo actualmente instalado, de 14 pulgadas, con una potencia de 90 W y diseñado para operar de manera estable con la fuente de energía disponible. Este ventilador no solo cumple con los requerimientos de flujo de aire establecidos en el diseño, sino que además su compatibilidad con el sistema eléctrico asegura un funcionamiento seguro y confiable. Sin embargo, el ventilador actual no posee el mismo calce exacto que el ventilador original planificado, lo que generó un pequeño desajuste en la instalación dentro de la estructura. Como parte de las mejoras futuras, se considera realizar ajustes en la estructura para optimizar su integración con este ventilador.

Además, las pruebas iniciales evidenciaron que, aunque el nuevo ventilador cumplía con los parámetros de flujo, la temperatura del aire a la salida del banco seguía siendo elevada, oscilando entre 70 °C y 75 °C. Por ello, se incorporó un extractor secundario para apoyar la ventilación. Este extractor permitió remover aire caliente adicional desde el interior del equipo, mejorando la disipación del calor y asegurando un desempeño más eficiente del sistema de enfriamiento.

Estos ajustes destacan la importancia de la flexibilidad y capacidad de adaptación en el proceso de diseño y construcción, asegurando que el sistema final cumpla con los objetivos del proyecto y opere de manera segura y eficiente.

4.5. Costos y recursos utilizados

El proyecto del banco de carga resistivo involucró una inversión total de \$388.865, según se detalla en la tabla presentada. Este monto incluye todos los materiales y componentes requeridos para la construcción del banco, así como herramientas específicas utilizadas durante el proceso. Los costos están distribuidos entre los años 2023 y 2024, reflejando tanto adquisiciones planificadas como el uso de materiales disponibles en el laboratorio de termofluidos, lo que permitió optimizar el presupuesto del proyecto.

La tabla a continuación resume de forma detallada todos los costos y recursos utilizados, presentando una división por año:

Año de compra	Objeto	Cantidad	precio unitario	Total parcial
2023	Ventilador 250mm 220V AC	1	\$43.673	\$43.673
2023	Angulo doblado 2x30x30	2	\$6.390	\$12.780
2023	Plancha de zinc alum 3000mmx1000mm + envió	1	\$20.990	\$20.990
2023	Calefactor de cuarzo md-1200	7	\$11.990	\$83.930
2023	Ruedas 50mm	4	\$4.990	\$19.960
2024	Hoja sierra caladora de metal	2	\$3.890	\$7.780
2024	Broca escalonada	1	\$5.290	\$5.290
2024	Broca 3mm	4	\$350	\$1.400
2024	AUTOMA. 1x32A 10ka CURVA C LEXO	1	\$5.390	\$5.390
2024	Interruptor Diferencial 2x25a 30ma Lexo	2	\$10.950	\$21.900
2024	Certificado	11	\$885	\$9.735
2024	Cable THHN 10 AWG(5,26mm) 90°C 600V x Mts Negro	11	\$885	\$9.735
2024	Cable THHN 10 AWG(5,26mm) 90°C 600V x Mts Rojo	11	\$885	\$9.735
2024	Cable THHN 10 AWG(5,26mm) 90°C 600V x Mts Verde	9	\$885	\$7.965
2024	CONECTOR PERNO PARTIDO 8-6 AWG SIN ESPIGA	1	\$1.390	\$1.390
2024	ENVIO NORMAL HASTA 1000KG	1	\$6.266	\$6.266

2024	Terminal Hembra Paleta Aislado Amarillo 12-10 AWG Bolsa 100un	1	\$8.650	\$8.650
2024	Enchufe Domiciliario Macho Volante 2p+ T 16A Negro FANTON	2	\$1.850	\$3.700
2024	HEMBRA EMBUTIDA IP44 32A 2P+T 220V	1	\$2.790	\$2.790
2024	Luz Piloto Led 22mm 220v IP67 VERDE	12	\$1.190	\$14.280
2024	Calota Interior 1-6CC Con Tapa Transp GRIS KALOP KL02476T	1	\$3.850	
2024	Punta philips doble	1	\$1.400	\$1.400
2024	Cable 1,5mm	6	\$240	\$1.440
2024	Cable 2,5mm	8	\$350	\$2.800
2024	multímetro digital	1	\$27.500	\$27.500
2024	fuelle de poder 240w 220V/12V +envió	1	\$15.880	\$15.880
2024	ventilador 14" 12V DC	1	\$34.391	\$34.391
2024	Lenteja autoperforante	1	\$1.800	\$1.800
2024	Perno M6 x20 con tuerca, golilla plana y golilla de presión	10	\$585	\$5.850
2024	perno M5 Con tuerca y golilla plana	12	\$350	\$4.200
2024	Conectores planos para cable de 1,5	20	\$150	\$3.000
2024	Discos de corte 4 1/2 "	3	\$1.000	\$3.000
Costo total del Proyecto				\$388.865

Tabla 8. Tabla de Costos y Recursos Utilizados del Proyecto

Fuente: Elaboración propia en Exel

Además, la construcción del banco tomó un tiempo estimado de 4 meses, durante los cuales se ejecutaron las diferentes etapas de fabricación, desde la estructura hasta la implementación de los sistemas eléctricos y de ventilación. En este tiempo, se realizaron ajustes y modificaciones necesarios para superar desafíos surgidos en el proceso, como el cambio de materiales y adaptaciones en los sistemas de ventilación, lo que garantizó la funcionalidad del equipo.

El proyecto no consideró costos operativos, centrándose únicamente en los costos de los materiales y recursos utilizados en la construcción. Este enfoque permitió priorizar la calidad de los componentes sin exceder el presupuesto inicial. Finalmente, los tiempos de

construcción reflejan la dedicación y planificación del equipo para cumplir con los objetivos establecidos, asegurando un resultado final acorde a los requerimientos técnicos y de diseño.

4.6. Conclusión de la construcción del Banco de carga resistivo

La construcción del banco de carga resistivo representó una etapa fundamental en el desarrollo del proyecto, en la cual se materializó el diseño conceptual en un equipo funcional y adaptado a las necesidades planteadas. Durante este proceso, se llevaron a cabo tareas como corte, ensamblaje, soldadura, cableado e instalación, utilizando herramientas y materiales seleccionados cuidadosamente para garantizar la precisión y calidad en cada etapa de fabricación.

El enfoque práctico, combinado con la capacidad de adaptación ante desafíos, como la necesidad de modificar materiales y componentes, permitió optimizar el diseño inicial y obtener un sistema confiable. Los ajustes realizados, tanto en la estructura como en los sistemas de ventilación y eléctrico, aseguraron que el equipo cumpliera con los objetivos del proyecto, manteniendo un equilibrio entre funcionalidad, eficiencia y seguridad.

La planificación de recursos y costos también desempeñó un papel esencial en el éxito de esta etapa, al permitir una gestión eficiente del presupuesto disponible. Este capítulo no solo subraya la importancia de una construcción meticulosa, sino también la relevancia de la flexibilidad y el análisis continuo durante el proceso de materialización del diseño.

Con el banco completamente ensamblado y probado, se dispone de un equipo capaz de llevar a cabo las pruebas requeridas para el motor Kubota DG972-E2, estableciendo una base sólida para los próximos capítulos del proyecto, que se centrarán en la validación de su desempeño y el análisis de resultados.

CAPITULO 5. Validación del Banco de Carga Resistivo

El proceso de validación del banco de carga resistivo constituye una etapa fundamental para garantizar que el diseño y la construcción del equipo cumplan con los objetivos planteados en el proyecto. Este capítulo tiene como propósito describir y analizar las pruebas realizadas para evaluar el desempeño general del banco, centrándose en aspectos clave como el funcionamiento del sistema eléctrico, la efectividad del sistema de ventilación y la solidez estructural.

La validación es crucial para verificar que cada componente y sistema integrado en el banco funcione de manera segura, eficiente y conforme a las especificaciones técnicas establecidas durante las etapas de diseño y construcción. Las pruebas realizadas permiten identificar posibles ajustes necesarios y confirmar que el banco de carga está preparado para operar bajo las condiciones previstas, cumpliendo con las expectativas tanto en términos de funcionalidad como de seguridad.

En las secciones siguientes se detallan las metodologías empleadas, los resultados obtenidos y el análisis correspondiente a cada prueba, lo que proporcionará una visión integral del desempeño del banco y su preparación para futuras aplicaciones.

5.1. Pruebas realizadas

I. Validación del sistema eléctrico.

La validación del sistema eléctrico del banco de carga resistivo se realizó conectando el equipo a la red eléctrica local, la cual opera bajo una limitación de 220 V y 16 A. Este procedimiento tuvo como objetivo verificar el correcto funcionamiento de los componentes eléctricos, asegurar su compatibilidad con la alimentación disponible y evaluar el desempeño del sistema bajo condiciones de operación real.

Durante las pruebas, se encendieron individualmente todas las resistencias y los LED indicadores, comprobando su funcionamiento adecuado. Asimismo, se verificó el desempeño de los ventiladores para asegurar una correcta integración del sistema de ventilación con el sistema eléctrico general. A continuación, se llevaron a cabo pruebas incrementales hasta alcanzar el consumo máximo permitido por la red local, el cual se registró en aproximadamente 3500 W.

El consumo máximo fue evaluado mediante distintas combinaciones de resistencias, lo que permitió identificar las configuraciones que optimizan el uso del equipo dentro de las limitaciones eléctricas del entorno. Paralelamente, se recopilaban datos a través del multímetro integrado, comparando el consumo de potencia real del equipo con el consumo de potencia de diseño. Estos resultados fueron fundamentales para confirmar la eficiencia del sistema eléctrico y su capacidad para operar de manera segura y confiable dentro de los parámetros establecidos.

II. Validación del sistema de enfriamiento.

La validación del sistema de enfriamiento del banco de carga resistivo se realizó mediante mediciones clave para evaluar su desempeño térmico. Estas mediciones incluyeron:

- La temperatura del aire a la salida de las rejillas de ventilación.
- La temperatura del aire a la salida del extractor.
- La temperatura del aire a la altura del suelo en el entorno del equipo.
- La temperatura del aire a la salida del ventilador, correspondiente al flujo de entrada al equipo.

Las mediciones se llevaron a cabo utilizando el anemómetro disponible en el laboratorio de termofluidos. Aunque no se dispone de información precisa sobre la marca y modelo del instrumento, este permitió obtener datos confiables para su análisis.

Con el equipo conectado a la red eléctrica local, limitada a 220 V y 16 A, el consumo máximo alcanzado durante las pruebas fue de aproximadamente 3500 W, limitado por la capacidad de la instalación eléctrica. A partir de las mediciones, se tabularon y graficaron los datos obtenidos, aplicando linealizaciones para extrapolar los valores esperados a plena capacidad del equipo, es decir, a su consumo máximo teórico de 6600 W. Este análisis permitió comparar las temperaturas calculadas con las obtenidas experimentalmente, validando así la eficiencia del sistema de ventilación en condiciones reales y su capacidad de disipar el calor generado dentro del equipo.

III. Validación estructural

La validación estructural del banco de carga resistivo se centró en garantizar la integridad y estabilidad de la estructura durante su operación. Aunque no se realizó un análisis estructural computacional, el diseño fue probado físicamente mediante una serie de inspecciones y evaluaciones prácticas para confirmar su capacidad de soportar las cargas generadas por los componentes instalados y las posibles vibraciones del sistema en funcionamiento.

La estructura fue sometida a pruebas de estabilidad al instalar y operar los principales componentes, como las resistencias, el ventilador, el extractor y el panel de control. Se verificó que la estructura mantuviera su rigidez y alineación sin deformaciones significativas, incluso durante la operación prolongada a consumo máximo permitido por la red local (3500 W).

Además, se evaluó el desempeño de las ruedas instaladas en las esquinas del banco. Estas ruedas no solo permiten una movilidad adecuada del equipo, sino que también soportaron el peso total del sistema sin presentar fallas mecánicas. Durante las pruebas, se confirmó que la estructura permanece nivelada y estable, facilitando su operación segura en diferentes ubicaciones del laboratorio.

Finalmente, las uniones soldadas realizadas con electrodo 6011 fueron inspeccionadas visualmente para garantizar que cumplieran con los estándares de resistencia requeridos. Las conexiones entre los elementos de la estructura demostraron ser lo suficientemente robustas para soportar el peso y las vibraciones asociadas al funcionamiento del banco.

5.2. Metodología de validación

La validación del banco de carga resistivo se llevó a cabo siguiendo un enfoque práctico y sistemático, dividido en tres áreas principales: validación eléctrica, validación del sistema de ventilación y validación estructural. Cada una de estas áreas se abordó mediante pruebas específicas, utilizando los recursos disponibles en el laboratorio de termofluidos y herramientas de medición para garantizar que el sistema cumpliera con los objetivos del diseño.

I. Validación Eléctrica

La validación del sistema eléctrico consistió en conectar el equipo a la red eléctrica local de 220 V y 16 A, verificando el correcto funcionamiento de los componentes eléctricos principales:

- Encendido de resistencias y LEDs: Se probó cada uno de los circuitos activados mediante los switches del panel de control, observando la iluminación de los LEDs y midiendo el consumo de potencia en cada combinación.
- Funcionamiento del ventilador y extractor: Se verificó la operación simultánea de ambos dispositivos.
- Consumo máximo del sistema: Debido a las limitaciones de la red eléctrica local, el equipo fue probado hasta un consumo de 3500 W, registrando mediciones con el multímetro para comparar el consumo real frente al de diseño.

II. Validación del sistema de enfriamiento

La validación del sistema de enfriamiento se enfocó en medir y analizar las temperaturas del aire en diferentes puntos del sistema:

- Medición de temperatura de salida: Se midió la temperatura del aire en las rejillas de salida, en la salida del extractor y en el nivel del suelo, así como la temperatura del aire que ingresa al equipo desde el ventilador.
- Uso de anemómetro: Las mediciones se realizaron utilizando el anemómetro disponible en el laboratorio.
- Tabulación y graficación de datos: Los valores obtenidos se tabularon y se extrapolaron para estimar el comportamiento del sistema a la capacidad máxima del equipo (6600 W) y compararlo con los datos calculados durante el diseño.

III. Validación Estructural

La validación estructural implicó inspecciones visuales y pruebas físicas para confirmar la integridad de la estructura:

- Pruebas de estabilidad: Se verificó que la estructura mantuviera su rigidez y alineación bajo el peso de los componentes y durante la operación.
- Evaluación de las ruedas: Se comprobó que las ruedas soportaran el peso del equipo, manteniendo la estabilidad y la movilidad.
- Inspección de soldaduras: Las uniones soldadas se inspeccionaron visualmente para garantizar su resistencia y estabilidad

Este enfoque metodológico permitió evaluar de manera integral el desempeño del banco de carga resistivo en condiciones reales de operación. Si bien algunas limitaciones, como la imposibilidad de alcanzar el consumo máximo debido a la red eléctrica local, condicionaron ciertos aspectos de la validación, los resultados obtenidos confirman que el equipo cumple con los objetivos funcionales, garantizando un desempeño seguro y eficiente en el laboratorio.

5.3. Resultados de las pruebas

La siguiente figura presenta una tabla de valores que presenta los datos obtenidos durante las validaciones.

Voltaje [V]	Corriente Consumida [A]	Potencia de diseño [W]	Potencia Consumida [W]	Temperatura a entrada ventilador Principal [°C]	Temperatura a la Salida Extractor °C	Temperatura Ambiente [°C]	Temperatura en la Rejilla de salida [°C]	Temperatura a la salida a nivel de suelo [°C]
224	0,23	46,2	47,8	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9
223	0,91	90	111,3	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9
223	1,09	136,2	164,1	19	19,2	18,9	18,9	18,9
222	2,61	536,2	550,2	19,1	19,3	18,9	19,6	19,4
222	4,34	936,2	943,6	19,9	20,1	18,9	20,2	20,5
221	6,03	1336,2	1314	20,4	20,9	18,9	21,4	21
220	7,79	1736,2	1705	21,1	21,2	18,9	22,3	22,1
219	9,51	2136,2	2074	22,3	22	18,9	23,9	23,4
218	11,2	2536,2	2430	21,3	22,2	18,9	25	24,7
218	12,9	2936,2	2797	22,3	23,6	18,9	25,7	25,9
217	14,65	3336,2	3169	23,1	25,1	18,9	26,8	26,5
216	16,25	3736,2	3510	23,5	25,4	18,9	28,5	27,6

Tabla 9. Tabla de datos obtenidos durante las Pruebas de Validación.

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos durante la validación del banco de carga resistivo, organizados según las áreas evaluadas.

I. Resultados de la validación eléctrica

- **Funcionamiento de los circuitos:** Todas las resistencias se activaron correctamente mediante los switches del panel de control, iluminándose los LEDs correspondientes sin anomalías. Esto valida la correcta funcionalidad de los circuitos eléctricos y la operatividad del panel de control.
- **Consumo de potencia:** El equipo fue probado hasta un consumo de 3510 W, limitado por la capacidad de la red eléctrica local (220 V y 16 A). Las mediciones realizadas con el multímetro mostraron que el consumo real del equipo, medido en incrementos de carga, es coherente con los valores de diseño. Por ejemplo, al alcanzar los 3510 W, la corriente consumida fue de 16,25 A, mientras que el voltaje medido osciló entre 216 y 223 V dependiendo de la carga.
- **Ventiladores y extractor:** Tanto el ventilador principal como el extractor operaron de manera estable durante las pruebas. Las temperaturas medidas en el sistema de ventilación confirmaron su correcto funcionamiento en la disipación térmica del calor generado por las resistencias.

II. Resultados de la validación del sistema de enfriamiento

- Temperatura del Aire en Diferentes Puntos:
 - La temperatura del aire a la entrada del ventilador fue constante durante las pruebas con un promedio de 20.8 °C, registrándose valores cercanos a la temperatura ambiente, con un promedio de 18,9 °C.
 - A la salida del extractor, la temperatura aumentó gradualmente a medida que se incrementaba la carga, alcanzando un valor máximo de 25,4 °C cuando el equipo consumía 3500 W.
 - En las rejillas de salida, las temperaturas oscilaron entre 18,9 °C en condiciones iniciales y 28,5 °C a plena carga.

- La temperatura a nivel del suelo mostró un comportamiento similar al de las rejillas, confirmando una adecuada distribución del flujo de aire caliente generado en el banco.
- **Comparación con los cálculos de diseño:** Las mediciones realizadas muestran una razonable concordancia con los cálculos de diseño. Sin embargo, las temperaturas registradas en las rejillas de salida a plena carga confirman la necesidad del extractor para mejorar la disipación térmica, especialmente en condiciones de máxima demanda.

III. Resultados de la validación estructural

- **Estabilidad de la estructura:** La estructura soportó el peso de los componentes sin deformaciones ni pérdida de rigidez, incluso durante las pruebas a plena carga. Esto valida la resistencia de los materiales y los métodos de construcción empleados.
- **Movilidad del banco:** Las ruedas instaladas facilitaron el transporte del banco dentro del laboratorio, demostrando ser adecuadas para las necesidades operativas del equipo.
- **Resistencia de las soldaduras:** Las uniones soldadas con electrodo 6011 no presentaron fisuras ni fallas tras la operación continua del equipo, confirmando su resistencia y fiabilidad.

En general, los resultados obtenidos validan la funcionalidad y seguridad del banco de carga resistivo bajo condiciones reales de operación. Si bien las temperaturas registradas en las rejillas de salida indican que el extractor es indispensable para garantizar una disipación térmica adecuada, el equipo cumple con los objetivos establecidos. Los resultados confirman su eficiencia y seguridad, destacando su capacidad para operar de manera estable y confiable en condiciones controladas.

5.4. Análisis de resultados

Los datos obtenidos durante las pruebas de validación del banco de carga resistivo permiten evaluar la funcionalidad, seguridad y desempeño del sistema en las áreas eléctrica, de ventilación y estructural. A continuación, se presenta el análisis de los principales resultados:

I. Validación Eléctrica

El equipo operó de manera estable dentro de las limitaciones impuestas por la red eléctrica local (220 V, 16 A), alcanzando un consumo máximo de 3500 W. Este valor representa aproximadamente el 53% de la capacidad total de diseño (6600 W). A pesar de no alcanzar el límite de diseño, las mediciones de corriente y potencia confirmaron que el sistema eléctrico funciona según lo esperado:

- La activación y desactivación de las resistencias mediante los switches del panel de control fue efectiva, y los LEDs indicaron correctamente el estado de cada circuito.

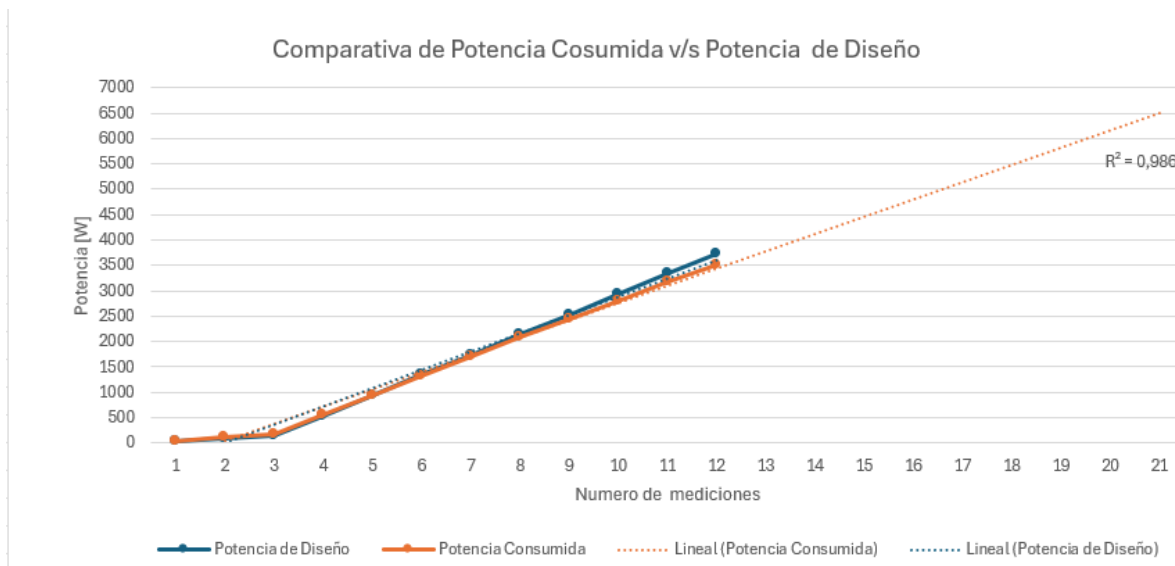


Figura 54. Grafica comparativa de potencia de diseño con la potencia consumida

Fuente: Elaboración propia en Excel

- El consumo medido por el multímetro presentó diferencias mínimas con los valores de diseño, como se muestra en la gráfica anterior.

Este análisis evidencia que el sistema eléctrico es funcional y seguro, aunque su capacidad total no pudo validarse debido a las limitaciones de la infraestructura eléctrica disponible.

II. Validación del Sistema de enfriamiento

Las mediciones realizadas en puntos clave del sistema de enfriamiento mostraron resultados consistentes con los cálculos realizados durante el diseño. Se destacan los siguientes puntos:

- La temperatura del aire a la salida del extractor mostró un incremento moderado con el aumento de la potencia consumida, alcanzando valores máximos de 24.4 °C a 3500 W. Esto sugiere que el flujo generado por el extractor es suficiente para evitar acumulaciones críticas de calor en la parte inferior del equipo.
- La temperatura en las rejillas de salida alcanzó un máximo de 28.5 °C, confirmando que el sistema de ventilación principal y el extractor trabajan en conjunto para disipar el calor generado.
- Las diferencias de temperatura entre la entrada del ventilador (19 °C - 23.5 °C) y las salidas indican que el sistema de ventilación opera de manera eficiente dentro del rango probado. Sin embargo, se evidencia que la temperatura en las rejillas sigue siendo elevada, lo que justifica la inclusión del extractor como elemento complementario.

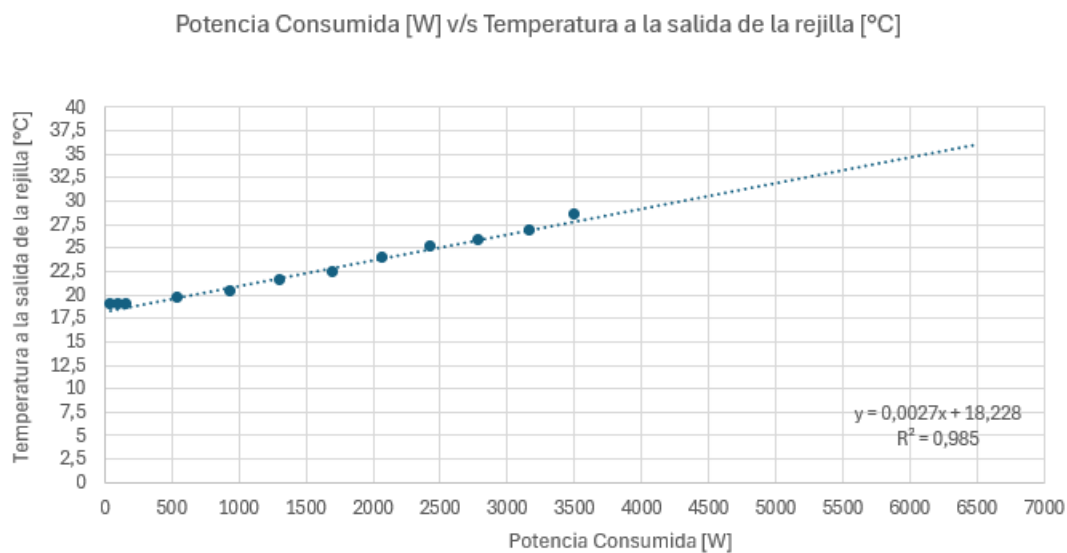


Figura 55. Relación entre la potencia consumida y la temperatura medida en la rejilla de salida

Fuente: Elaboración propia en Excel

Esta grafica lleva hecha una extrapolación de datos para poder obtener la temperatura a la que llegaría el aire a la salida de la rejilla del banco de carga con el fin de poder comprar con los datos calculados previamente. Según la gráfica al consumir alrededor de los 6600 W lo cual sería la carga plena del equipo la temperatura de la salida en la rejilla seria de alrededor de los 36°C, al comparar esto con los datos previamente calculados la temperatura de la salida

en la rejilla seria de alrededor de unos 75,5 °C a 78 °C esto solo usando el ventilador principal. Esto nos quiere decir que el trabajo complementario del extractor logra bajar la temperatura en una gran medida en la salida del equipo.

Este análisis confirma la funcionalidad del sistema de enfriamiento a plena carga, aunque se recomienda considerar mejoras futuras para optimizar la disipación térmica.

III. Validación estructural

La estructura del banco mostró un desempeño robusto bajo las condiciones de operación probadas. Los principales hallazgos son:

- Las ruedas instaladas permitieron una movilidad adecuada sin afectar la estabilidad del equipo.
- Las uniones soldadas resistieron las tensiones generadas por el funcionamiento del equipo, sin presentar fisuras ni deformaciones.
- El peso combinado de los componentes no comprometió la rigidez ni la funcionalidad de la estructura.

En general, la estructura cumplió con los requisitos de diseño, demostrando ser segura y funcional para su propósito.

Por otra parte, los resultados obtenidos demuestran que el banco de carga resistivo cumple con los objetivos de diseño en las áreas evaluadas. Si bien las pruebas no alcanzaron el límite máximo de potencia debido a restricciones externas, los datos obtenidos validan el diseño y funcionamiento del equipo bajo las condiciones probadas. Se identificaron áreas de mejora, como la optimización del sistema de ventilación, que podrían ser abordadas en futuras actualizaciones para maximizar el desempeño del banco.

CONCLUSIÓN

El desarrollo de este proyecto, centrado en el diseño, construcción y validación de un banco de carga resistivo para el motor Ciclo Otto Kubota DG972-E2, constituye un aporte significativo para la evaluación y optimización de motores bajo condiciones controladas. A través de la implementación de conceptos teóricos y prácticos, se lograron cumplir los objetivos establecidos, entregando un equipo funcional que satisface las necesidades técnicas y operativas.

El diseño del banco incorporó elementos innovadores, como el uso de resistencias de cuarzo y un sistema de ventilación por convección forzada, lo que permitió garantizar un funcionamiento seguro y eficiente dentro de los parámetros definidos. La etapa de construcción fue especialmente crítica, ya que la selección adecuada de materiales y herramientas, junto con los ajustes realizados, facilitó la superación de desafíos estructurales y técnicos.

La validación confirmó el desempeño eléctrico, mecánico y térmico del banco, destacándose su capacidad para soportar un consumo de potencia de hasta 3500 W en condiciones reales de operación, restringido por la infraestructura eléctrica disponible. Los datos obtenidos mostraron una correspondencia razonable con los cálculos teóricos, lo que validó tanto el diseño como la funcionalidad del equipo. No obstante, se identificaron áreas de mejora, como la optimización del sistema de ventilación para reducir aún más las temperaturas de salida. Este proyecto no solo alcanzó los objetivos propuestos, sino que también estableció las bases para futuras investigaciones y aplicaciones, como la evaluación de motores que utilizan combustibles alternativos. Además, el banco de carga resistivo construido podrá servir como referencia y herramienta práctica para el desarrollo de nuevas soluciones en contextos académicos e industriales.

En síntesis, la experiencia adquirida durante este proyecto refuerza la relevancia de la ingeniería mecánica en la creación de soluciones prácticas y sostenibles para los desafíos actuales. Asimismo, resalta la importancia del trabajo colaborativo, la adaptabilidad frente a los desafíos y el rigor técnico como pilares fundamentales para el éxito.

REFERENCIAS

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Power Backup. (n.d.). *Load bank testing*. Retrieved December 2, 2024, from <https://power-backup.ro/load-bank-testing/>

Ohmite Manufacturing. (n.d.). *Load bank applications*. Retrieved December 2, 2024, from <https://www.ohmite.com/load-bank-applications/>

Avtron Power. (n.d.). *Load bank basics*. Retrieved December 2, 2024, from <https://avtronpower.com/resources/articles/load-bank-basics/>

Wattco. (2018, March). *A closer look at load banks*. Retrieved December 2, 2024, from <https://www.wattco.com/2018/03/closer-look-load-banks/>

Thompson Power Systems. (n.d.). *Why conduct load bank testing for your generator?* Retrieved December 2, 2024, from <https://thompsonpowersystems.com/resources/blog/why-conduct-load-bank-testing-for-your-generator/>

Arshon Technology. (n.d.). *Understanding load banks: A comprehensive guide*. Retrieved December 2, 2024, from <https://arshon.com/blog/understanding-load-banks-a-comprehensive-guide/>

Kohler Uninterruptible Power. (n.d.). *What is load bank testing and how does it work?* Retrieved December 2, 2024, from <https://www.kohler-ups.co.uk/what-is-load-bank-testing-and-how-does-it-work/>

Donwil. (n.d.). *Best practices for load bank testing your generator*. Retrieved December 2, 2024, from <https://www.donwil.com/best-practices-for-load-bank-testing-your-generator/>

Kanthal. (n.d.). *Simulation load banks for electric dissipation and resistance*. Retrieved December 2, 2024, from <https://www.kanthal.com/en/industries/electronics/simulation-loadbanks-electric-dissipation-resistance/>

Chroma. (n.d.). *DC Electronic Load*. Retrieved December 2, 2024, from https://www.chromaate.com/en/products_list/dc_electronic_load

Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *The Art of Electronics* (3rd ed.). Cambridge University Press.

Rashid, M. H. (2016). *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications* (4th ed.). Pearson Education.

Kubota Corporation. (2009). *Workshop manual: Gasoline, LPG, natural gas engine WG972-E2, DF972-E2, DG972-E2* (Code No. 9Y111-03180). KiSC

Anexo

1. Especificaciones Técnicas de los elementos del Banco de Carga

Especificaciones Técnicas del Cable THHN 10 AWG:

- Sección transversal: 5,26 mm² (10 AWG).
- Corriente máxima: 40 A en ducto y 55 A al aire.
- Tensión nominal: 600 V.
- Temperatura máxima de operación: 90 °C (150 °C en caso de corto circuito).
- Material: Conductor de cobre recubierto con aislamiento de PVC y nylon, lo que le proporciona resistencia a hidrocarburos, aceites y grasas.

Especificaciones Técnicas del Cable Libre de Halógenos H07Z1-K 2.5 mm²

- Sección transversal: 2,5 mm².
- Corriente máxima: 18 A en ducto.
- Tensión nominal: 450/750 V.
- Temperatura máxima de operación: 70 °C (110 °C en caso de corto circuito).
- Material: Conductor de cobre flexible con aislamiento termoplástico libre de halógenos.

Especificaciones Técnicas de los Switches:

- Modelo: Xunma XM1-23.
- Capacidad nominal: Tensión: Hasta 250 VAC. Corriente: Hasta 16 A.
- Resistencia térmica: Diseñado para operar bajo condiciones de T125/55, lo que asegura un desempeño confiable en ambientes con temperaturas variables.
- Tipo de acción: Mecánico, con un accionamiento confiable que garantiza seguridad y facilidad de uso.

Especificaciones Técnicas de los indicadores Led:

- Diámetro de Montaje: 22 mm
- Tensión de Alimentación: 220V AC
- Consumo de Corriente: ≤ 20 mA
- Vida Útil Eléctrica: $\geq 30,000$ horas
- Grado de Protección: IP67
- Temperatura de Operación: -25°C a 55°C

Especificaciones Técnicas del interruptor automático:

- Marca: Lexo
- Modelo: EBS3B-63
- Número de Polos: 1P
- Capacidad de Corriente: 32 A
- Capacidad de Corte (Icn): 10 kA
- Tensión Nominal: 230/400 V
- Frecuencia: 50/60 Hz
- Curva de Disparo: Tipo C
- Grado de Protección: IP20
- Temperatura de Trabajo: -5°C a +40°C
- Tipo de Interruptor: Palanca (ON/OFF)
- Resistencia Eléctrica: 15,000 ciclos
- Resistencia Mecánica: 20,000 ciclos
- Dimensiones: 85 x 18 x 73 mm
- Peso: 114 g

Especificaciones Técnicas del Interruptor diferencial:

- Marca: Lexo
- Modelo: EBS6R
- Número de Polos: 2P
- Corriente Nominal: 25 A
- Sensibilidad: 30 mA
- Tensión Nominal: 230 V
- Frecuencia: 50/60 Hz
- Tiempo de Disparo: <0.1 s
- Resistencia Eléctrica: 10,000 ciclos
- Resistencia Mecánica: 20,000 ciclos
- Material: Plástico de alto impacto
- Grado de Protección: IP20
- Temperatura de Funcionamiento: -5°C a +40°C
- Dimensiones: 35.5 x 83.7 x 76.4 mm
- Peso: 220 g

Especificaciones Técnicas del medidor digital PZEM-061:

- Voltaje de Funcionamiento: 80 a 260 V CA
- Corriente Máxima: 100 A
- Rango de Medición de Potencia: 0 a 22 kW
- Rango de Medición de Energía: 0 a 9999 kWh
- Frecuencia de Operación: 45 a 65 Hz
- Precisión de Medición: Clase 1.0
- Consumo de Energía: 0.2 W
- Dimensiones: 84.75 mm x 45 mm x 24.5 mm
- Peso: 87 g

Especificaciones Técnicas del conector principal:

- Tipo: Hembra embutida industrial
- Configuración de Polos: 2P+T (dos polos más tierra)
- Corriente Nominal: 32 A
- Tensión Nominal: 220 V
- Grado de Protección: IP44 (protección contra objetos sólidos de más de 1 mm y salpicaduras de agua)
- Material: Plástico de alto impacto, libre de halógenos
- Temperatura de Operación: -50°C a +80°C
- Dimensiones: 69 x 69 x 47 mm
- Peso: 112 g

2. Manual de Uso

El presente manual de uso ha sido diseñado para proporcionar una guía clara y detallada sobre la correcta operación, mantenimiento y seguridad del banco de carga resistivo. Este equipo ha sido desarrollado con el propósito de simular cargas eléctricas resistivas mediante resistencias de cuarzo, permitiendo evaluar el desempeño y comportamiento de motores y sistemas eléctricos en condiciones controladas.

En este manual, encontrará información sobre las características técnicas del banco, las instrucciones paso a paso para su operación segura, las recomendaciones de mantenimiento preventivo, y las medidas de seguridad que deben observarse durante su uso. Es fundamental leer y comprender completamente este manual antes de operar el equipo para garantizar un funcionamiento óptimo y seguro.

Instrucciones de Uso

Conexión del Banco de Carga Resistivo

- I. Conexión a la Fuente de Alimentación: El equipo cuenta con una extensión con dos enchufes machos de 16A cada uno, diseñados para conectarse a una red eléctrica o fuente externa disponible. **Precaución: Este equipo está diseñado para operar con un máximo de 220 V y 30 amperes. Verifique que la fuente de alimentación cumpla con estos requisitos antes de proceder.**
- II. Verificación de Energización: Una vez conectado el equipo, el multímetro ubicado en la esquina superior izquierda del panel de control se encenderá automáticamente, indicando que el equipo está energizado. Como lo indica la siguiente imagen



Activación de los Sistemas Principales

- III. Encendido del Interruptor Automático: Abra la calota protectora ubicada en la esquina superior derecha del panel. En el centro de esta encontrará el interruptor automático. Levántelo para energizar los sistemas principales del banco. Como se muestra en la siguiente imagen:

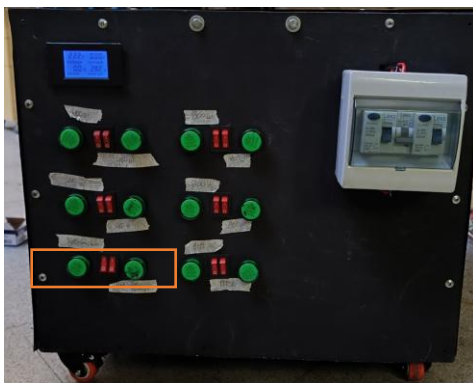


IV. Activación de las Protecciones Diferenciales:

- El interruptor diferencial izquierdo activa la primera columna de interruptores dobles (de izquierda a derecha).
 - El interruptor diferencial derecho activa la segunda columna de interruptores dobles (más cercana a la calota).
- Active ambos diferenciales según las necesidades operativas del banco.

Encendido del Ventilador y Extractor

- V. Antes de encender las resistencias, es imprescindible activar el sistema de ventilación para garantizar una correcta disipación del calor, para ello localice el último interruptor doble de la primera columna (debajo del multímetro). Son aquellos al interior del recuadro en la siguiente imagen:
- Interruptor izquierdo: Enciende el extractor.
 - Interruptor derecho: Enciende el ventilador.

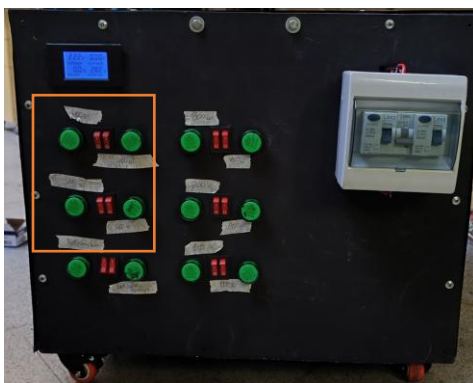


Encienda ambos sistemas para garantizar un flujo de aire adecuado.

Encendido de las Resistencias

VI. Una vez que el ventilador y el extractor estén operativos, proceda a encender las resistencias:

- Interruptores dobles de la primera columna: Cada lado de estos interruptores provoca un consumo de 400 W. Son aquellos al interior del recuadro en la siguiente imagen:



- Interruptores dobles de la segunda columna: Cada lado de estos interruptores provoca un consumo de 800 W. Son aquellos al interior del recuadro en la siguiente imagen:



Encienda los interruptores según los requerimientos de carga resistiva para el ensayo.

Precaución: Si el consumo total alcanza o supera los 5000 W, tenga especial cuidado con el aire caliente que emana del equipo. Mantenga una distancia segura del flujo de aire caliente.

Apagado y Enfriamiento del Equipo

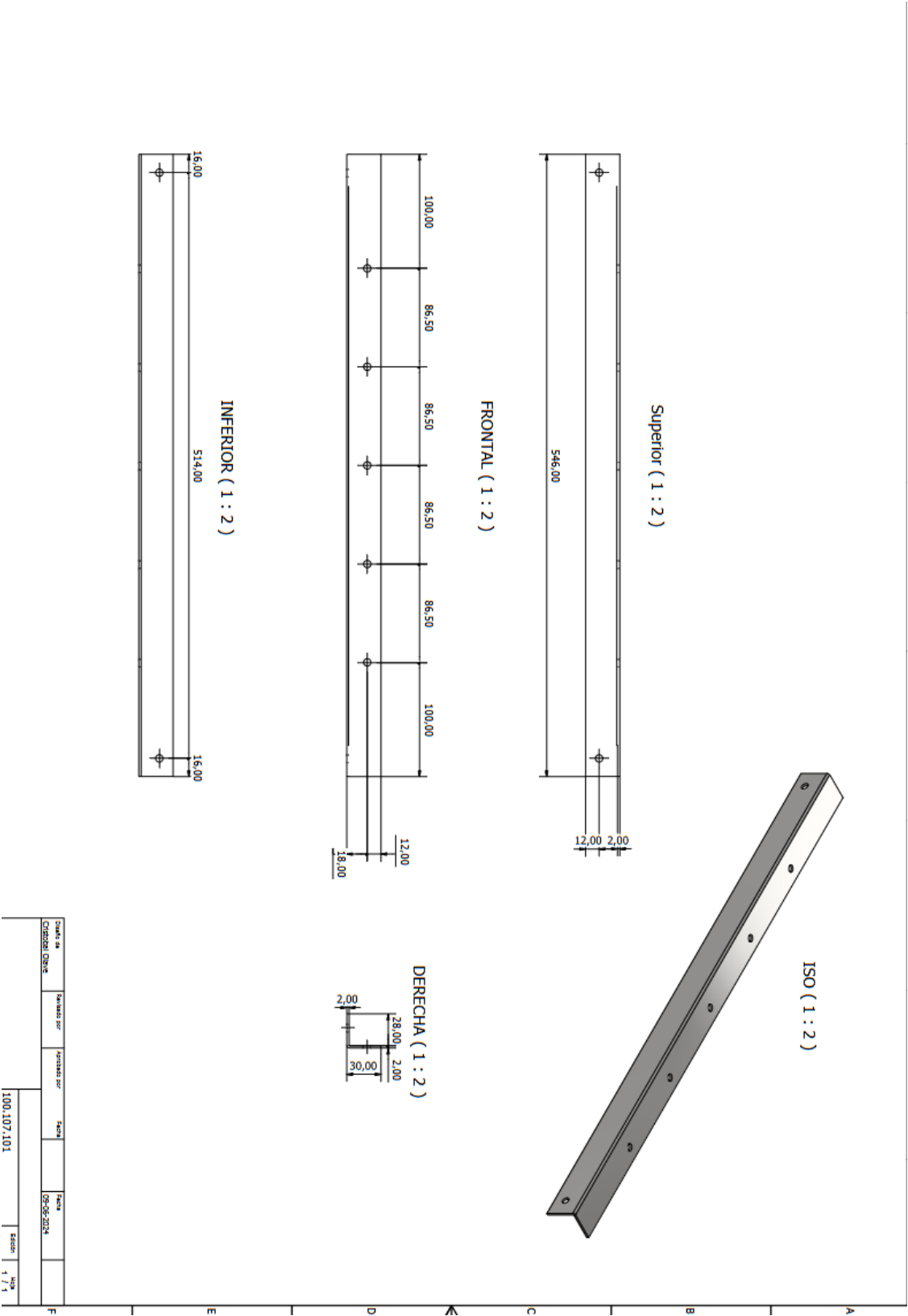
- VII. Una vez finalizada la prueba, apague las resistencias desactivando todos los interruptores dobles.
- VIII. Deje los ventiladores y el extractor encendidos durante al menos 5 minutos para permitir que el equipo se enfríe correctamente.
- IX. Después del tiempo de enfriamiento, apague los ventiladores y el extractor, y asegúrese de desconectar todos los interruptores del sistema.
- X. Finalmente, desconecte el equipo de la fuente de alimentación.

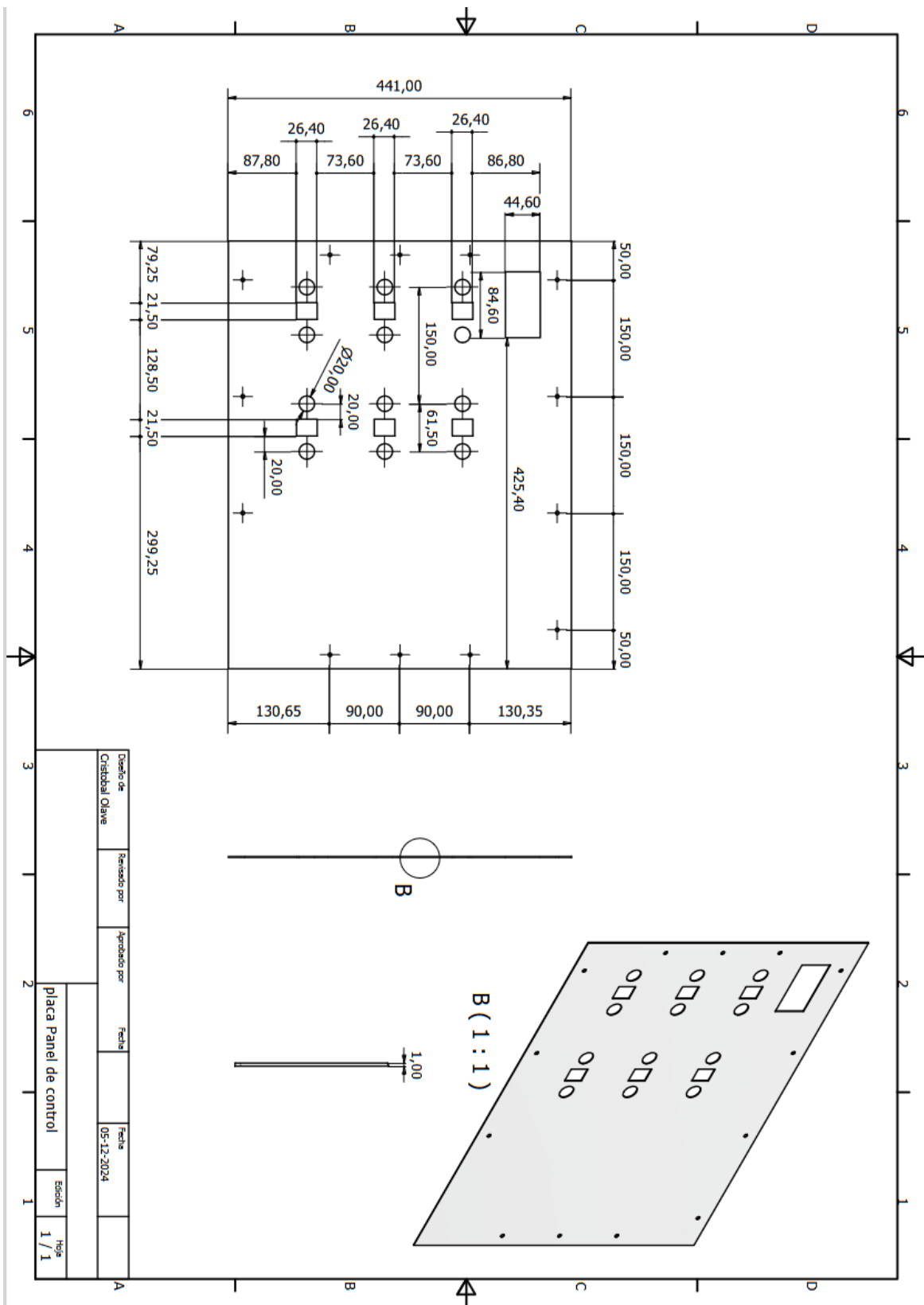
Precauciones

- **No exceda la capacidad máxima del equipo (220 V, 30 A).**
- **Manténgase a una distancia segura del flujo de aire caliente generado por el equipo, especialmente en condiciones de alta carga (5000 W o más).**
- **Verifique siempre que el sistema de ventilación esté activado antes y después de utilizar las resistencias.**
- **Desconecte todos los interruptores y retire el equipo de la fuente de alimentación después de cada uso para garantizar la seguridad del sistema.**

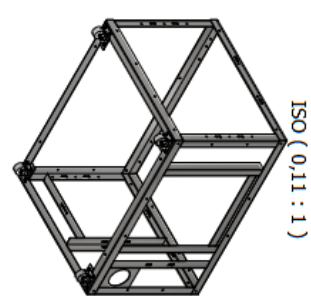
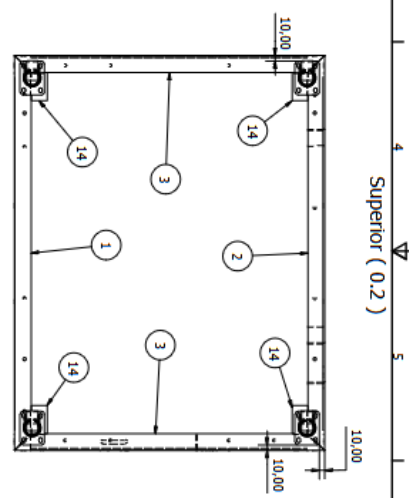
Nota: Para reiniciar el consumo de potencia kWh en el multímetro mantener presionado el botón que este tiene hasta que el valor del consumo llegue a 0.

3. Planos

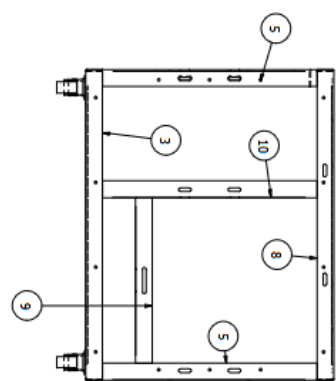




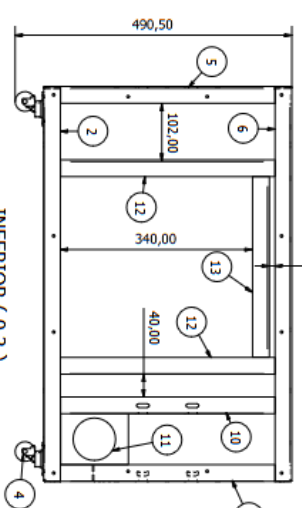
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCION
1	1	100.100.103	Angulo 30x30x2
2	1	100.100.102	Angulo 30x30x2
3	2	100.100.101	Angulo 30x30x2
4	4	ruedas	
5	4	100.101.101	Angulo 30x30x2
6	1	100.102.103	Angulo 30x30x2
7	1	100.102.102	Angulo 30x30x2
8	2	100.102.101	Angulo 30x30x2
9	1	100.105.101	Angulo 30x30x2
10	2	100.105.102	Angulo 30x30x2
11	1	100.103.101	Angulo 30x30x2
12	2	100.104.101	Angulo 30x30x2
13	1	100.104.102	Angulo 30x30x2
14	4	100.100.104	Placa soporte rueda



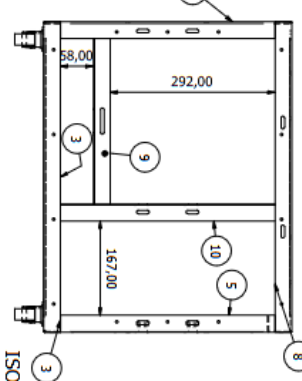
Izquierda (0.2)



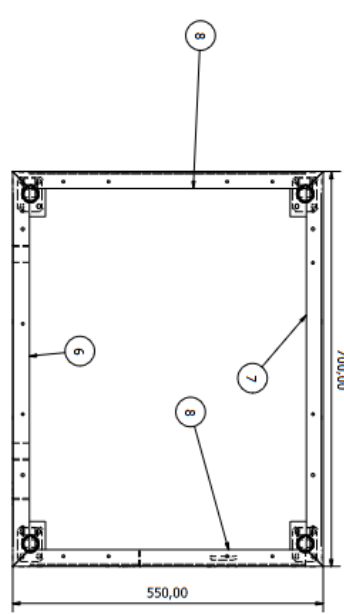
FRONTAL (0.2)



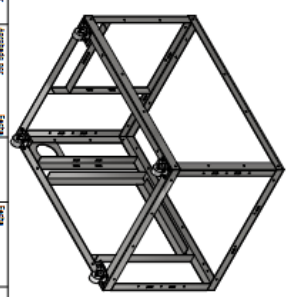
DERECHA (0.2)



INFERIOR (0.2)

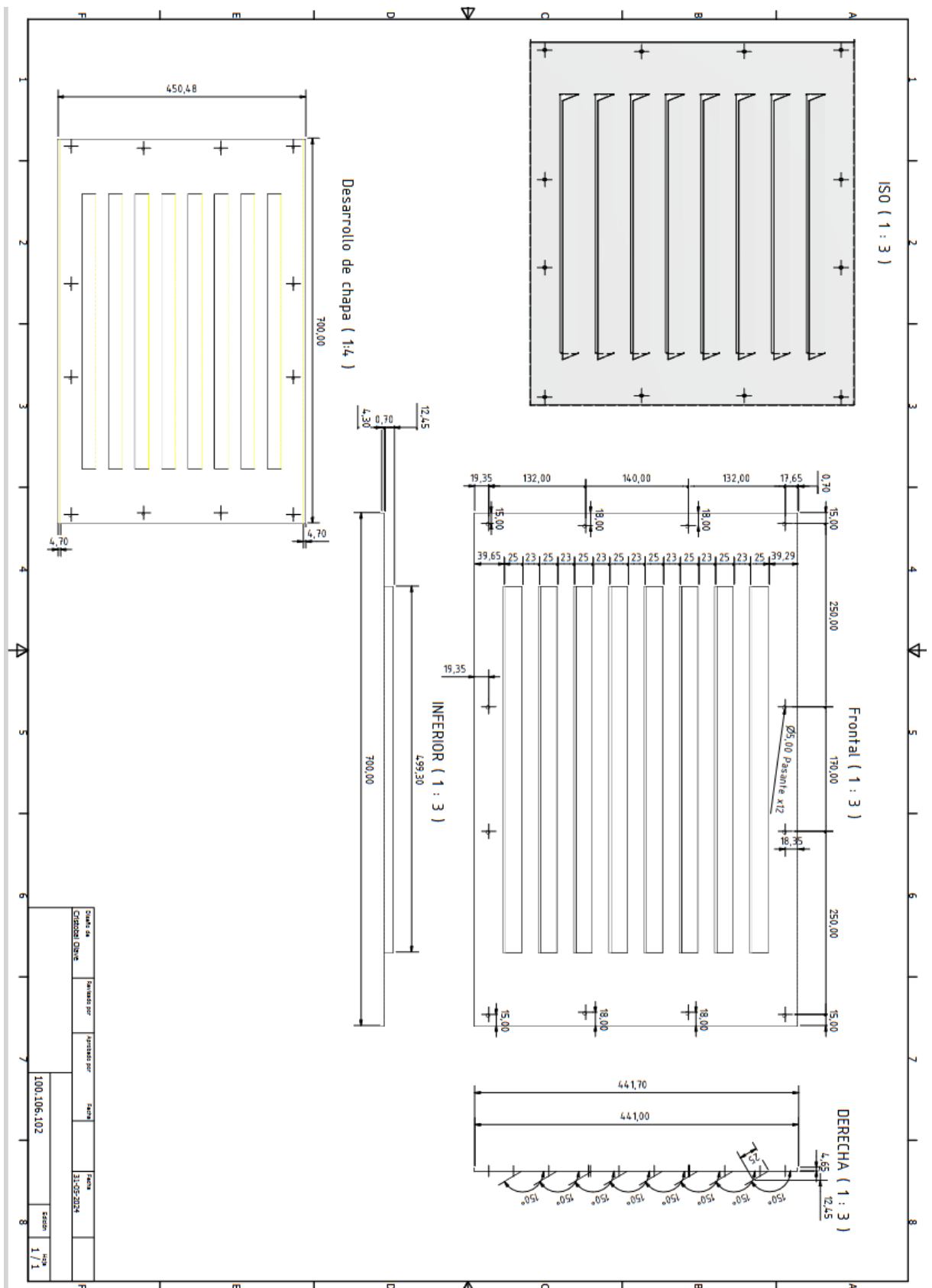


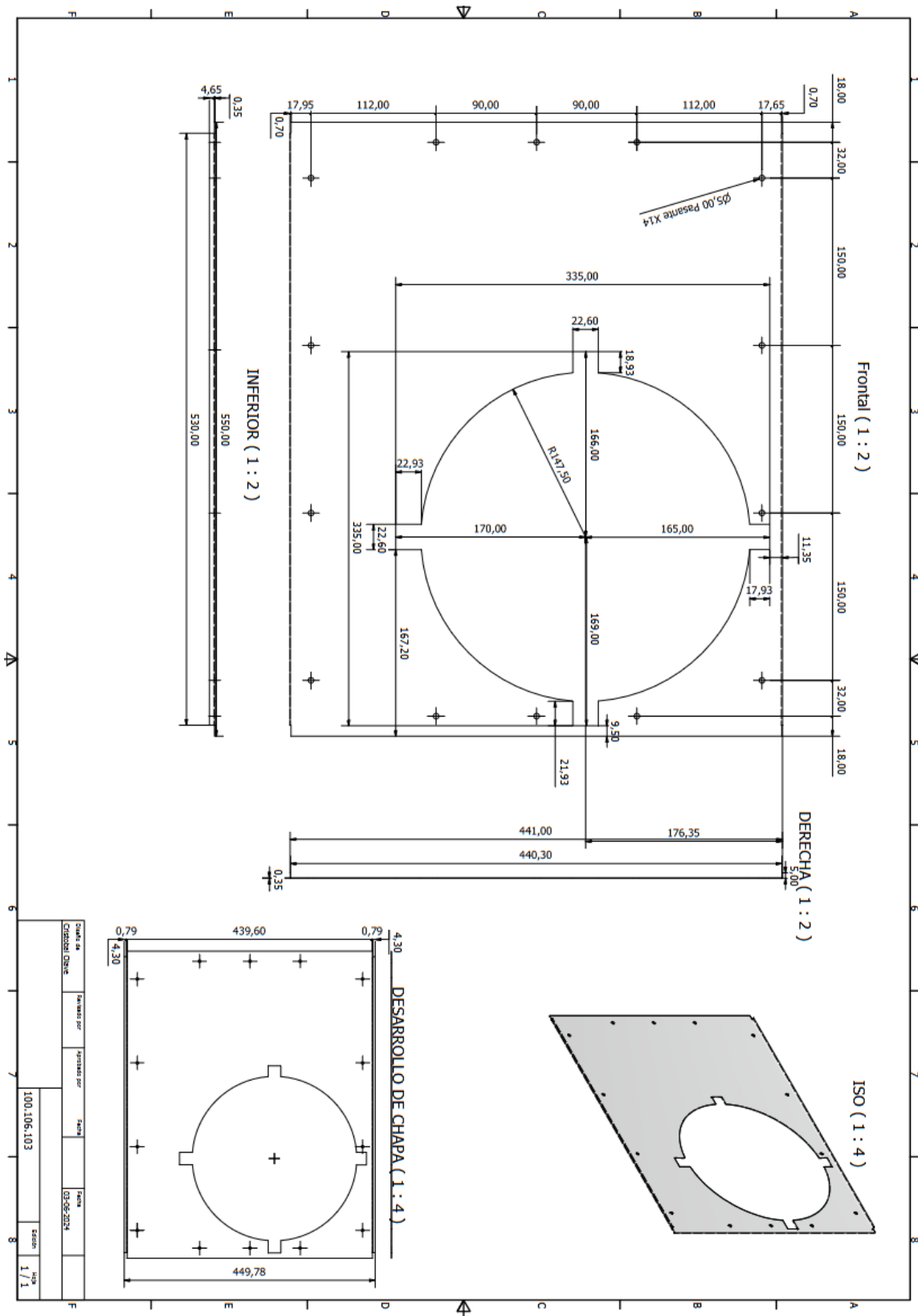
ISO (0,11 : 1)

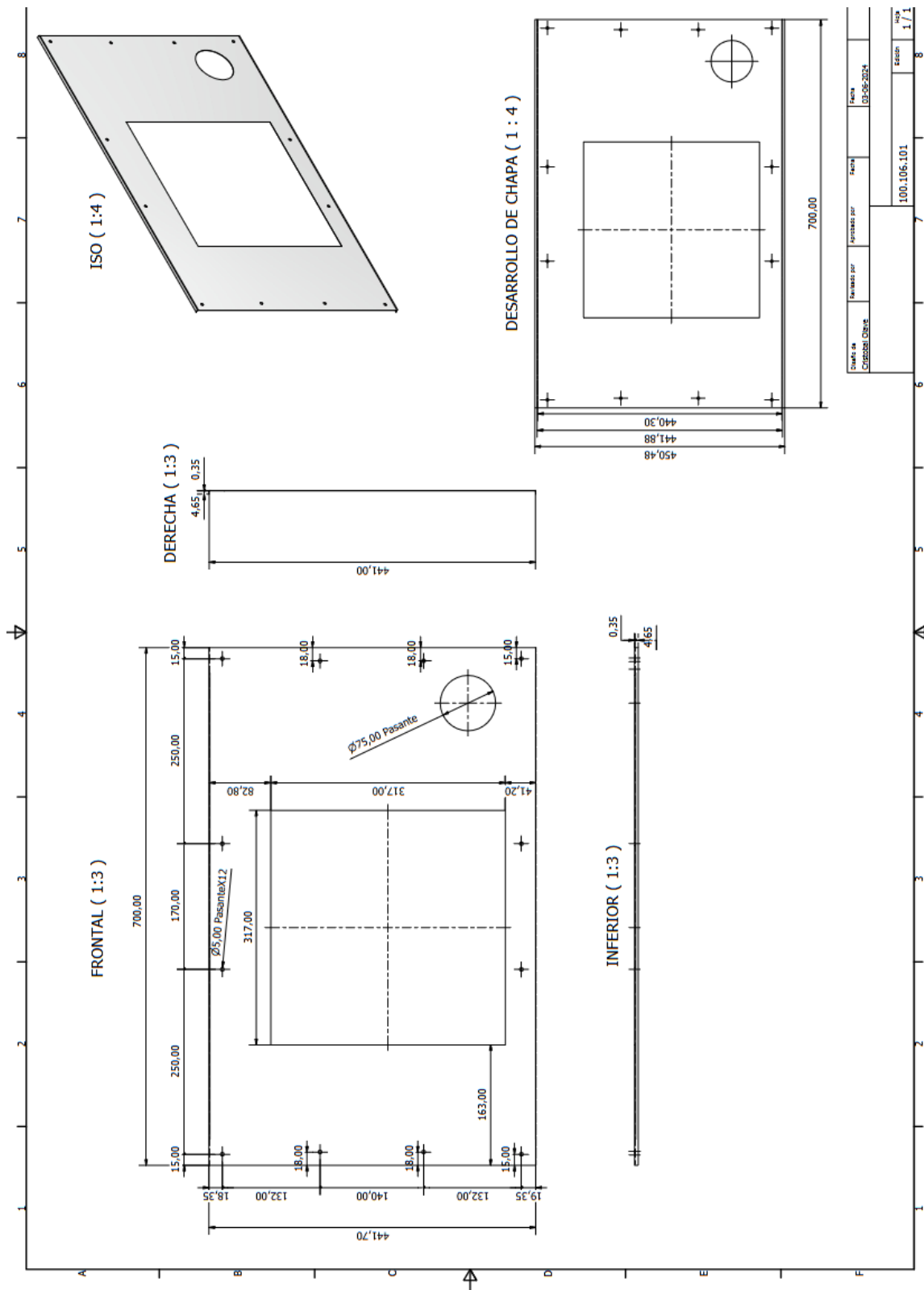


Todas la uniones de piezas con excepción de las ruedas, deben ser realizadas por medio de soldadura al arco o MIG, en caso de ser al arco utilizar electrodo 6011. Los Cordenes deben ser de filete dado el bajo espesor que tienen los elementos.

Cualificación	Evaluado por	Aprobado por	Fecha	10-06-2024
Cristian Doria				
Ensamblaje			Edición	Versión
7				1 / 1
			8	







4. Vista 3D del interior del equipo e instalación de componentes

