

Diseño de un Banco de pruebas de laboratorio para generación de energía eléctrica empleando una turbina Michell-Banki.

Juan Felipe Martínez Núñez

María José Rangel Vera

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

Manuel de Jesús Martínez

PhD. Mecánica computacional

Codirector

Manuel Salvador Acosta Castro

Ingeniero Mecánico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Dedico este logro a mis padres, por su inmenso esfuerzo durante todos estos años de crianza, colmados de amor, paciencia y dedicación. Gracias por depositar siempre su confianza en mí y por alentarme cada día sin falta. Agradezco también a DPM Proyectos e Ingeniería S.A.S., la empresa con la que tuve la oportunidad de trabajar mientras adelantaba mis estudios, por el apoyo y la confianza brindados. Extiendo igualmente mi gratitud a mi compañera de trabajo, quien con su compañía constante fue parte fundamental de este camino, así como a mis hermanos, mi compañera de vida, mis amigos, mi sobrina, mi cuñado y mis mascotas, quienes aportaron alegría y fortaleza en cada etapa del proceso.

Juan Felipe Martínez

Dedico este logro a mis papás y mi hermana que me acompañaron y estuvieron conmigo en todo este proceso, siempre entregándome lo mejor de ellos para que yo pudiera entregar lo mejor de mí. De la misma manera, agradezco a mi compañero de trabajo con quien compartimos a la par este proceso y con su disposición y amistad pudimos culminar de la mejor manera. A mi novio, que tuvo la paciencia y siempre estuvo dispuesto a ayudar. A mis amigos y familiares que siempre estuvieron alentándome en cada etapa.

María José Rangel Vera

Agradecimientos

Con profundo y sincero agradecimiento, expresamos nuestro reconocimiento a todos los docentes que nos acompañaron en nuestra formación a lo largo de la vida académica, desde el preescolar hasta la culminación del pregrado. Extendemos un especial agradecimiento a nuestro director, Manuel de Jesús, por su orientación académica y sus valiosas recomendaciones para nuestro futuro, así como a nuestro codirector, Manuel Salvador Acosta, por su constante apoyo y disposición para lograr el éxito de este proyecto. Finalmente, agradecemos de manera especial a todas las personas que nos brindaron su respaldo y acompañamiento durante este proceso.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Justificación	13
2. Objetivos	15
2.1 Objetivo General	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3. Marco teórico	16
3.1 Turbina hidráulica	16
3.2 Turbina Michell-Banki	18
3.3 Generación eléctrica	21
3.4 Tableros Eléctricos	24
4. Antecedentes técnicos y fundamentos del rediseño del sistema hidráulico adaptado al banco de laboratorio	26
4.1 Características generales del sistema	26
4.2 Proceso de selección de la turbina	28
4.3 Diseño físico del sistema	31
4.3.1 Diseño de la turbina Michell-Banki	32
5. Diseño del sistema hidráulico	36
5.1 Diagrama hidráulico del sistema	37
5.2 Cálculos hidráulicos	39
6. Diseño eléctrico	46
6.1 Cálculo conductor de alimentación	48

	5
6.2 Dimensionamiento del tablero eléctrico.....	51
7. Diseño de la transmisión mecánica.....	54
7.1 Cálculo del sistema de transmisión.....	55
7.2 Cálculos de potencia	57
8. Selección de componentes y análisis de costos unitarios	59
8.1 Selección de compontes	59
8.1.1 Bastidor	59
8.1.2 Sistema hidráulico	60
8.1.3 Sistema de transmisión.....	66
8.1.4 Sistema eléctrico:	67
8.2 Análisis presupuestal del sistema.....	70
9. Elaboración de plan de mantenimiento AMEF y guías de laboratorio.....	71
9.1 Plan de mantenimiento AMEF.....	71
9.2 Guías de laboratorio	74
10. Conclusiones.....	77
Referencias Bibliográficas	80
Apéndices.....	84

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Clasificación de las turbinas hidráulicas según la dirección del flujo de agua.....</i>	16
Tabla 2 <i>Características generales del sistema base.....</i>	26
Tabla 3 <i>Clasificación de una turbina según su N_s y N_q</i>	30
Tabla 4 <i>Resultados del diseño del rodete de la turbina Michell-Banki.....</i>	33
Tabla 5 <i>Resultados del diseño del eje de la turbina Michell-Banki.....</i>	34
Tabla 6 <i>Resultados del diseño del inyector de la turbina Michell-Banki.....</i>	35
Tabla 7 <i>Coefficientes de pérdida de los accesorios del sistema.....</i>	43
Tabla 8 <i>Resultados Matriz QFD.....</i>	47
Tabla 9 <i>Dimensiones finales del tablero eléctrico.....</i>	53

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Elementos principales de la turbina Michell-Banki</i>	18
Figura 2 <i>Rangos operativos de diferentes turbinas hidráulicas</i>	20
Figura 3 <i>Ilustración del ciclo hidráulico</i>	28
Figura 4 <i>Diagrama de flujo del diseño de una turbina</i>	31
Figura 5 <i>Diagrama hidráulico del banco de laboratorio</i>	37
Figura 6 <i>Alternador Mecc Alte Eogen</i>	48
Figura 7 <i>Distribución interna tablero eléctrico</i>	52
Figura 8 <i>Diagrama plano de conexiones eléctricas y electrónicas de tablero</i>	54
Figura 9 <i>Sistema de poleas</i>	57
Figura 10 <i>Renderizado final banco de laboratorio</i>	59

Lista de Apéndices

	Pag
Apéndice A. Tabla de consumos del banco de pruebas	84
Apéndice B. Matriz QFD.....	85
Apéndice C. Listado de materiales internos del tablero	86
Apéndice D. Tanque seleccionado para el banco de pruebas	87
Apéndice E. Accesorio tipo salida de tanque.....	87
Apéndice F. Tubería seleccionada PVC 1”	87
Apéndice G. Unión universal.....	88
Apéndice H. Dimensiones de la bomba CPM 650M, monofásica 110V.....	88
Apéndice I. Codos 90°	88
Apéndice J. Válvula de globo Enolgas	89
Apéndice K. Indicador de presión ABZMM100-10 BAR/PSI-U/B-G de Bosch Rexroth	89
Apéndice L. Accesorio tipo tee PVC 1” X ½”	89
Apéndice M. Indicador de caudal digital PIUSI K24	90
Apéndice N. Polea trapezoidal de 2 ranuras tipo SPA.....	90
Apéndice O. Bloques de distribución Onka.....	90
Apéndice P. Fuente 12V CZELE MDR-6012	91
Apéndice Q. Multímetro digital.....	91
Apéndice R. Breaker monopolar ABB 1×16 A, capacidad de ruptura 6 kA.....	92
Apéndice S. Accesorios del tablero	92
Apéndice T. Análisis presupuestal.....	94
Apéndice U. Tabla AMEF	96

Apéndice V. Guía de laboratorio de generación de energía	100
Apéndice W. Perdidas y tuberías	102
Apéndice X. Guía de laboratorio de turbinas hidráulicas	104
Apéndice Y. Planos banco de pruebas	106

Resumen

Título: Diseño de un Banco de pruebas de laboratorio para generación de energía eléctrica empleando una turbina Michell-Banki*

Autor: Juan Felipe Martínez Núñez, María José Rangel Vera**

Palabras Clave: Turbina Michell-Banki, Banco de pruebas hidráulico, generación hidroeléctrica.

Descripción: Colombia se caracteriza por producir gran parte de la energía que consume a través de centrales hidroeléctricas. En el departamento de Santander se encuentra una de las megacentrales más importantes del país, responsable de alrededor del 10% de la generación nacional, equivalente a 5056 Wh/año. No obstante, la Universidad Industrial de Santander, particularmente la Escuela de Ingeniería Mecánica, no dispone de un banco de laboratorio destinado al estudio de este tipo de generación eléctrica.

Con el propósito de fortalecer la formación académica y práctica de los estudiantes, se llevó a cabo el diseño de un banco de pruebas hidráulico que permita evidenciar la generación de energía mediante una turbina Michell-Banki. El sistema propuesto se proyecta con una velocidad de operación de 290,48 rpm, garantizando el funcionamiento adecuado de la turbina, y con la capacidad de generar 340,86 Wh diarios, energía que podría emplearse en cargas como luces LED y tomacorrientes, que en un futuro pueda emplearse para energizar parte del laboratorio de la universidad.

El proyecto incluyó la selección de los componentes y materiales necesarios, acompañados de un análisis presupuestal que demuestra su viabilidad económica. Asimismo, se elaboraron guías de laboratorio orientadas al correcto uso del banco, con el fin de facilitar el aprendizaje de los fundamentos de la generación hidroeléctrica. Finalmente, se formuló un plan de mantenimiento AMEF, orientado a prolongar la vida útil del sistema y asegurar su sostenibilidad en el tiempo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Manuel de Jesús Martínez. PhD, Mecánica Computacional. Codirector: Manuel Salvador Acosta. Ingeniero Mecánico.

Abstract

Title: Design of a laboratory test bench for electric power generation using a Michell-Banki turbine *

Author(s): Juan Felipe Martínez Núñez, María José Rangel Vera **

Key Words: Michell-Banki Turbine, Hydraulic Test Bench, Hydroelectric Generation.

Description: Colombia is characterized by producing most of the energy it consumes through hydroelectric power plants. One of the country's most important megaplants is in the department of Santander, accounting for approximately 10% of national generation, equivalent to 5056 Wh/year. However, the Universidad Industrial de Santander, particularly the School of Mechanical Engineering, does not have a laboratory bench dedicated to the study of this type of power generation.

In order to strengthen the academic and practical training of students, the design of a hydraulic test bench was carried out to demonstrate electricity generation through a Michell-Banki turbine. The proposed system is projected to operate at a speed of 290.48 rpm, ensuring the proper functioning of the turbine, and has the capacity to generate 340,86 Wh per day, energy that could be used to supply loads such as LED lights and sockets, that in the future it may be used to power part of the university laboratory.

The project included the selection of the required components and materials, along with a budget analysis that demonstrates its economic feasibility. In addition, laboratory guides were developed to ensure the proper use of the bench and to facilitate the learning of the fundamentals of hydroelectric generation. Finally, a maintenance plan based on FMEA methodology was formulated, aimed at extending the service life of the system and ensuring its long-term sustainability.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Manuel de Jesús Martínez. PhD, Computational Mechanics. Codirector: Manuel Salvador Acosta. Mechanical Engineer

Introducción

En Colombia, la generación hidroeléctrica constituye la principal fuente de energía eléctrica, lo que resalta la importancia de contar con espacios académicos que permitan comprender de manera práctica los procesos de conversión de energía hidráulica en eléctrica. Los bancos de pruebas cumplen este propósito, ya que facilitan la experimentación y el análisis de los factores que determinan el desempeño y la eficiencia de estos sistemas.

El presente trabajo aborda el diseño de un banco de pruebas hidráulico basado en una turbina Michell-Banki, concebido para su implementación en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. El sistema fue proyectado con una velocidad de operación de 290,48 rpm y una capacidad de generación de 340,86 Wh diarios, energía suficiente para alimentar cargas de baja potencia en el laboratorio. Para ello, se seleccionaron los componentes hidráulicos, mecánicos y eléctricos requeridos, considerando criterios técnicos, económicos y de disponibilidad en el mercado.

Como complemento, se elaboraron guías de laboratorio que describen los procedimientos de operación, seguridad y análisis de resultados, con el fin de apoyar las prácticas académicas. Además, se formuló un plan de mantenimiento bajo la metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF), orientado a preservar la confiabilidad y sostenibilidad del sistema.

De esta manera, el proyecto integra el diseño ingenieril con el componente pedagógico, consolidándose como una herramienta para fortalecer la formación en generación hidroeléctrica y el estudio de turbomáquinas de flujo cruzado.

1. Justificación

Actualmente, el 70% de la electricidad suministrada en Colombia se produce en plantas hidroeléctricas (UPME et al., 2015) lo que resalta la relevancia de estas tecnologías en el contexto energético del país. Sin embargo, la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS no cuenta con un banco de pruebas que permita ejemplificar este proceso. Esta carencia limita la capacidad de los estudiantes para estudiar de manera práctica, mediante experimentos, el diseño, la eficiencia y el comportamiento de sistemas de generación de energía basados en turbinas hidráulicas

Dado lo anterior, es fundamental implementar en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS un banco de pruebas con este propósito. Se propone utilizar como referencia el proyecto “Diseño y análisis de un sistema 'Pluvio-eléctrico' adaptable a la región del Chocó biogeográfico colombiano”, en el cual ya se diseñó y construyó un modelo funcional de una turbina Michell-Banki.

La turbina Michell-Banki, conocida por su alta eficiencia, capacidad para operar en un rango de velocidades y caudales de agua variables, y su bajo costo de operación y mantenimiento (Romero et al., 2020), representa una opción viable para la generación de energía a pequeña escala en un entorno de laboratorio. La implementación de este banco de pruebas podría tener un impacto positivo en la región, promoviendo la investigación y el desarrollo de tecnologías limpias y eficientes. El proyecto ha sido concebido con el propósito de desarrollar el diseño del banco de pruebas, dejando abierta la posibilidad de que, en una segunda fase, o mediante un proyecto complementario, se lleve a cabo la construcción e implementación física.

Adicionalmente, es crucial implementar una guía de laboratorio que detalle el uso del sistema de generación, incluyendo instrucciones claras para su operación, mantenimiento y las

pruebas que se pueden realizar, con el fin de facilitar su aplicación en prácticas académicas. También se debe elaborar un plan de mantenimiento integral para el sistema de generación, que incluya procedimientos de inspección, diagnóstico y reparación, garantizando la longevidad y eficiencia operativa del equipo.

Frente a esta problemática surge la pregunta: ¿Cómo diseñar un sistema de generación de energía utilizando una turbina Michell-Banki que se adapte a las necesidades del banco de pruebas de laboratorio hidráulico de la UIS?

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Diseñar un banco de pruebas que demuestre el proceso de generación hidroeléctrica, permitiendo la realización de prácticas de laboratorio mediante la integración de una turbina Michell-Banki para la escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS.

2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un banco de pruebas de laboratorio con el propósito de definir parámetros de operación y requerimientos del sistema que permita evidenciar fenómenos tales como:
 - Generación eléctrica con una capacidad de entre 500 y 1500 W.
 - Turbinas (Caudal entre 1-2 litros por segundo).
 - Pérdidas en tuberías y accesorios.
- Seleccionar los componentes y materiales necesarios para el sistema unificado del banco de pruebas, considerando criterios técnicos y económicos, a través de un proceso de ingeniería integral que abarque las áreas de estudio de hidráulica y eléctrica.
- Elaborar guías de laboratorio y un plan de mantenimiento AMEF que aseguren el uso eficiente y adecuado del laboratorio una vez finalizada su construcción.

3. Marco teórico

En este marco teórico se presentan los fundamentos necesarios para el desarrollo del proyecto. Se abordarán las turbinas hidráulicas y sus clasificaciones, con énfasis en el principio de funcionamiento de la turbina Michell-Banki. Además, se explorarán los conceptos clave de la generación de energía eléctrica y la integración de alternadores de vehículos en sistemas de conversión de energía.

3.1 Turbina hidráulica

El diseño de turbinas hidráulicas ha sido un campo de estudio activo desde el siglo XIX, con el desarrollo de las primeras máquinas de alta eficiencia para convertir la energía cinética del agua en energía mecánica. Esta conversión se logra mediante generadores acoplados a las turbinas, las cuales están compuestas por una hilera de álabes fijados a un eje giratorio o una placa. El movimiento del eje es resultado del impacto del agua, cuya velocidad y presión generan un cambio en la energía del sistema. (Dincer & Bicer, 2020)

En cuanto a su clasificación, las turbinas hidráulicas se dividen según la dirección del flujo de agua de la siguiente manera:

Tabla 1

Clasificación de las turbinas hidráulicas según la dirección del flujo de agua

Clasificación turbinas hidraulicas según la dirección del flujo

Flujo axial	La dirección de la corriente de agua es paralela al eje de rotación de los alabes. Por ej: Turbina Kaplan
Flujo radial	La dirección de la corriente de agua es perpendicular al eje de rotación de los alabes. Por ej: Turbina Pelton
Flujo mixto	La dirección del flujo de agua que entra por la turbina es diferente de la dirección del flujo que sale por la turbina. Por ej: Turbina Francis

Flujo cruzado

El flujo de agua atraviesa la turbina en diagonal o cruzando los álabes de la turbina. El caudal de agua pasa dos veces por los rodetes. Por ejemplo: Turbina Michell-Banki

Elaboración propia

Además, existe otro tipo de clasificación en función del cambio de la presión del agua al pasar por el rotor:

Turbinas de impulso: En este tipo de turbinas, la presión del agua se mantiene constante a la entrada y la salida del rotor. Al pasar por la turbina, la energía del agua se convierte en energía cinética, la cual se transfiere a los álabes montados en el eje cuando el chorro de agua los impacta. Esto genera un movimiento de rotación en el rodete.

A diferencia de las turbinas de reacción, en las turbinas de impulso la presión no varía dentro del rotor, ya que la conversión de energía se da exclusivamente por el impacto del agua. Sin embargo, la trayectoria del flujo puede modificarse mediante elementos como álabes guía, álabes guía ajustables y álabes giratorios. Un ejemplo. Turbina Pelton. (Dincer & Bicer, 2020)

Turbinas de reacción: A diferencia de las turbinas de impulso, las turbinas de reacción experimentan un cambio de presión en el flujo durante su funcionamiento. Estas turbinas cuentan con una carcasa en forma de espiral, por donde el agua ingresa de manera tangencial desde múltiples direcciones, generando un efecto de remolino.

A medida que el agua fluye hacia el rotor, la presión actúa sobre las aspas, haciéndolas girar y permitiendo la conversión de energía. Posteriormente, el agua es expulsada axialmente a través de un tubo de aspiración, el cual genera un efecto de succión que contribuye a mejorar la eficiencia en la transferencia de energía. Por ejemplo, Turbina Francis, Turbina Kaplan. (*Turbina de Reacción: Descripción General* / *Temas de ScienceDirect*, n.d.)

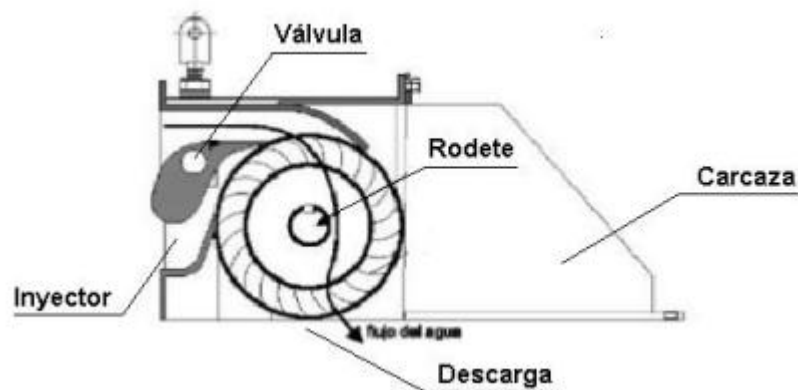
3.2 Turbina Michell-Banki

La turbina Michell-Banki es una turbomáquina hidráulica utilizada para la generación de energía de hasta 2000 kW. Su principal característica es la simplicidad en su construcción, lo que la hace una opción rentable en ciertos rangos de caída y caudal en comparación con otras turbinas convencionales. Sin embargo, esta ventaja estructural también implica ciertas limitaciones operativas respecto a turbinas más sofisticadas. (Orge et al., 2008)

En términos de diseño, la turbina Michell-Banki está compuesta por cuatro elementos principales, los cuales se ilustran en la Figura 1: el rodete (rotor), el inyector o tobera, la tubería de conducción y el álabe director o directriz. Adicionalmente, cuenta con una carcasa que, en la mayoría de los diseños, cumple la función de chasis, evitando la dispersión del agua y protegiendo el rotor de la entrada de elementos extraños. (Orge et al., 2008)

Figura 1

Elementos principales de la turbina Michell-Banki

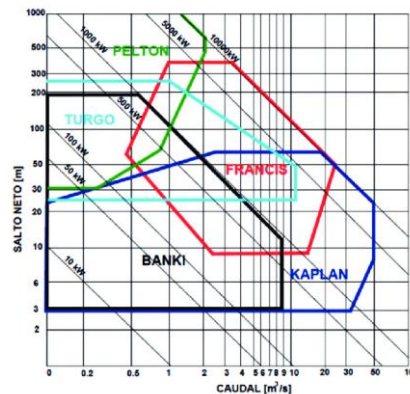


Tomado de *Construction and Performance Evaluation of a Michell-Banki Turbine Prototype* (p. 4), por L.S Paris , J.D Peláez, C.Mira, 2013, The First LACCEI International Symposium on Mega and Micro Sustainable Energy Projects.

El rodete está formado por dos discos paralelos unidos por una serie de álabes curvados con bordes afilados, diseñados para minimizar la resistencia al flujo y mejorar la eficiencia en la conversión de energía. El inyector, es el componente encargado de regular y orientar el agua que se introduce en la turbina y su diseño está enfocado en que el chorro de agua impacte a los álabes del rodete con un ángulo de ataque (α), además, posee una pared superior que guía el fluido con la menor pérdida obteniendo el mayor aprovechamiento de energía. En cuanto el álabe director su finalidad es regular el caudal dentro de la turbina reduciendo la sección del ducto a la entrada. Por último, la tubería de conducción transporta el fluido desde la captación hasta el inyector. (Romero et al., 2020)

El principio de funcionamiento de la turbina Michell-Banki se basa en la transformación de la energía potencial (derivada de la altura del salto de agua) en energía cinética antes de que el fluido ingrese al rodete, el cual opera a presión atmosférica. En primer lugar, el agua es transportada desde la fuente de captación hasta el inyector, donde se acelera y se dirige hacia el rodete. Al ingresar, el flujo impacta el primer grupo de álabes (de admisión), transfiriendo aproximadamente el 70% de su energía. Posteriormente, el agua atraviesa el rodete y entra en contacto con un segundo grupo de álabes, donde se transfiere el 30% restante de la energía disponible. Finalmente, el fluido sale del rodete y es devuelto al cuerpo de agua del cual fue captado, completando el ciclo de operación. (Romero et al., 2020)

En la Figura 2 se presentan los rangos operativos de distintos tipos de turbinas hidráulicas, incluyendo la turbina Michell-Banki. A partir de esta gráfica, se observa que, para potencias inferiores a 1000 kW, la Michell-Banki, a pesar de sus desventajas, representa una opción más económica y viable en comparación con otras turbinas, como la Francis.

Figura 2*Rangos operativos de diferentes turbinas hidráulicas*

Tomado de *La energía hidroeléctrica en Córdoba ante el paradigma ambiental* (p. 188), por S. Reyna, T. Reyna, M.Lábaque, Research Gate.

Además de sus ventajas económicas, la turbina Michell-Banki resulta especialmente atractiva para proyectos de generación a pequeña escala debido a su diseño modular, el cual permite ajustar su capacidad según los requerimientos específicos del sistema. Su fabricación es relativamente sencilla, lo que facilita su implementación en diversas aplicaciones (Khosrowpanah et al., 1984).

Asimismo, su facilidad de instalación y mantenimiento permite que, con la capacitación adecuada, incluso personas sin una especialización técnica puedan llevar a cabo tareas de mantenimiento (Khosrowpanah et al., 1984). Por último, su buen desempeño en condiciones de carga parcial representa una ventaja significativa en zonas donde la densidad de carga es baja y se requiere una regulación eficiente de la demanda (Sammartano et al., 2013).

3.3 Generación eléctrica

La generación eléctrica consiste en la conversión de diversas formas de energía presentes en la naturaleza, como la química, térmica e hidráulica, en energía eléctrica. Generalmente, este proceso se lleva a cabo mediante un sistema conformado por un alternador acoplado a un motor primario, el cual puede ser una turbina de vapor, una turbina hidráulica o un motor de combustión interna, entre otros. El motor primario transforma la energía disponible en energía mecánica, que posteriormente el alternador convierte en electricidad mediante los principios de inducción electromagnética (VK Mehta & Rohit Mehta, 1982).

Un generador eléctrico es una máquina que convierte energía mecánica en energía eléctrica gracias a la interacción de sus componentes: el rotor, que constituye la parte dinámica, y el estator, que corresponde a la parte estática (Harrouz et al., 2016).

Su principio de funcionamiento se basa en la inducción electromagnética, un fenómeno en el que se induce un voltaje en las espiras de un conductor debido a la variación del campo magnético. Este voltaje se genera por el movimiento relativo entre el conductor y el campo magnético, ya sea porque el campo magnético de un imán se desplaza cerca de un conductor estacionario o porque el conductor se mueve dentro de un campo magnético fijo (Paul G. Hewitt, 2016).

Para comprender este fenómeno, es fundamental la Ley de Faraday, la cual establece que "el voltaje inducido en una bobina es proporcional al número de espiras, al área transversal de cada espira y a la tasa de cambio del campo magnético en dichas espiras" (Paul G. Hewitt, 2016). Asimismo, la cantidad de corriente generada depende del voltaje inducido, la resistencia de la

bobina y las características del circuito al que está conectada. Existen tres formas principales de inducir voltaje: moviendo una espira cerca de un imán, desplazando un imán cerca de una espira o alternando la corriente en una espira adyacente. En todos los casos, es imprescindible la presencia de un campo magnético variable (Paul G. Hewitt, 2016).

Los generadores eléctricos se clasifican en dos tipos principales según el tipo de corriente que producen:

- **Generadores de corriente alterna (alternador):** La mayoría de estos generadores eléctricos producen corriente alterna y operan de manera síncrona, es decir, giran a la velocidad de sincronismo, la cual depende del número de polos de la máquina y de la frecuencia de la fuerza electromotriz. Esta relación garantiza que el rotor gire a la misma velocidad impuesta por el campo magnético del estator. (la relación tiene una fórmula) (*El Generador Eléctrico*, n.d.)
- **Generadores de corriente continua (dinamo):** Es una máquina eléctrica rotativa que convierte la energía mecánica en energía eléctrica de corriente continua. Una de sus principales características es su reversibilidad, lo que permite su uso tanto como generador como motor. (*El Generador Eléctrico*, n.d.)

Asimismo, los generadores se pueden clasificar según la velocidad de giro del rotor y su campo magnético:

- **Generadores Síncronos:** Son comunes en este tipo de aplicaciones por su capacidad de operar a velocidades bajas. De la misma manera, requieren un sistema

de sincronización y regulación de voltaje. Están diseñados para entregar potencia neta en condiciones de servicio específicas. (Grigsby et al., 2007)

- **Generadores Asíncronos:** Se utilizan en hidroeléctricas pequeñas (menos de 5 MVA) debido a su menor costo y la eliminación de componentes, Obtienen su corriente de excitación del sistema eléctrico, por lo que no son adecuados para sistemas aislados. Son más sencillos y económicos, pero su uso es limitado a instalaciones con conectividad a la red. (Grigsby et al., 2007)

La utilización de alternadores automotrices como generadores en sistemas de generación de energía renovable constituye una alternativa viable desde una perspectiva tanto técnica como económica. Aunque estos dispositivos han sido diseñados para alimentar los sistemas eléctricos de los vehículos y recargar sus baterías, pueden ser adaptados para aplicaciones de microgeneración en turbinas eólicas y sistemas hidroeléctricos de pequeña escala. (Ani et al., 2014)

Desde un enfoque técnico, los alternadores automotrices presentan diversas ventajas. Su diseño robusto les permite operar en entornos exigentes con variaciones de temperatura, humedad y vibraciones, lo que los hace adecuados para aplicaciones fuera del sector automotriz. Asimismo, su alta disponibilidad en el mercado y su bajo costo los convierten en una opción atractiva en comparación con generadores diseñados específicamente para sistemas de energías renovables. Además, incorporan sistemas de regulación de voltaje que facilitan su integración con bancos de baterías y cargas variables. (Ani et al., 2014)

Para su correcta implementación en sistemas de generación de energía, los alternadores requieren un sistema de transmisión mecánica adecuado que les permita alcanzar su velocidad óptima de operación. En su configuración original, están diseñados para operar a altas revoluciones

por minuto (RPM), lo que puede requerir el uso de sistemas de reducción o amplificación de velocidad, como transmisiones por poleas o engranajes, cuando se acoplan a turbinas de baja velocidad. (Ani et al., 2014)

Desde un punto de vista económico, la implementación de un alternador automotriz en un sistema de generación de energía a pequeña escala puede representar una reducción significativa en los costos de producción eléctrica. Según estudios previos, la sustitución de generadores convencionales por alternadores automotrices puede disminuir el costo de inversión en hasta un 50 % (Ani et al., 2013), sin afectar considerablemente el rendimiento energético. Adicionalmente, su mantenimiento es relativamente sencillo y económico, ya que sus componentes pueden ser reemplazados fácilmente, lo que prolonga la vida útil del sistema. (Ani et al., 2014)

En términos de rendimiento energético, se ha determinado que un sistema basado en alternadores automotrices puede alcanzar una eficiencia de hasta el 60 % bajo condiciones óptimas de operación. Sin embargo, su desempeño puede mejorar mediante modificaciones en el sistema de excitación y el uso de controladores electrónicos que optimicen la conversión de energía. (Ani et al., 2014)

3.4 Tableros Eléctricos

El concepto de tablero eléctrico describe un conjunto de equipos o dispositivos diseñados para el uso eléctrico como lo es la distribución, protección y control de circuitos; usualmente, posee interruptores, puentes, borneras, cableado, fusibles, contactores y otros elementos cruciales para el uso de final de cualquier máquina u operación industrial (Referencia). Su estructura externa, conocida como gabinete o cofre, suele estar fabricada en metal para brindar resistencia y seguridad.

Además, su diseño debe cumplir con normativas y certificaciones tanto nacionales como internacionales, garantizando su correcto desempeño y minimizando riesgos en las instalaciones eléctricas.

Su correcto funcionamiento depende de la selección de materiales adecuados, la implementación de protecciones eficaces y el cumplimiento de normativas como la NTC 5001, NTC 2050 y el RETIE. En Colombia, la NTC 5001, basada en la IEC 61439, establece los requisitos generales para tableros de distribución eléctrica. También es fundamental cumplir con la NTC 2050, que regula la instalación eléctrica de edificaciones, asegurando que el diseño y la construcción de los tableros cumplan con las exigencias técnicas y de seguridad. El RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas) es obligatorio en el país y regula la instalación y mantenimiento de tableros eléctricos. A nivel internacional, normas como la UL 508A, aplicable a tableros industriales en Norteamérica, y el NFPA 70 (NEC - National Electrical Code) establecen reglas para la seguridad eléctrica en instalaciones de baja tensión.

En su estructura, los tableros pueden estar fabricados acero laminado en frío, generalmente recubierto con pintura electrostática para evitar la corrosión. En ambientes agresivos, se recomienda el uso de lámina de acero inoxidable. Otra alternativa no muy común, es el aluminio, es ligero y resistente a la corrosión, pero con poca resistencia mecánica. Existen otras opciones de materiales para el gabinete del tablero eléctrico como plásticos y polímeros usadas para soluciones generales y en ambientes industriales químicos. También pueden ser clasificados según su nivel y norma de protección, si es tipo IP o tipo NEMA, a mayor nivel, mayor resistencia ante corrosión y resistencia mecánica hasta la valoración de áreas clasificadas que requieran alta protección.

4. Antecedentes técnicos y fundamentos del rediseño del sistema hidráulico adaptado al banco de laboratorio

Para dar inicio al presente proyecto, se tomó como base el trabajo de grado “**Diseño y análisis de un sistema pluvio-eléctrico adaptable a la región del Chocó biogeográfico colombiano**”, realizado en la Universidad Industrial de Santander. Dicho trabajo estableció las bases conceptuales, técnicas y constructivas para el diseño de un sistema de generación hidroeléctrica a partir del uso de la turbina Michell-Banki. Con el fin de desarrollar un sistema orientado a fines académicos, se adaptaron y rediseñaron diferentes componentes del sistema mencionado, con el propósito de implementarlo como banco de pruebas para laboratorio.

4.1 Características generales del sistema

En primer lugar, tenemos las características generales del sistema el cual fue diseñado para operar como una nano-central hidroeléctrica con el uso del agua de lluvia. Las cuales son:

Tabla 2

Características generales del sistema base

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SISTEMA

Caudal	10 [LPS]
Altura	15 [m]
Potencia	1,471 [kW]
Tiempo de operación por ciclo	16,7 [min]
Numero de Ciclos por día	7
Volumen del tanque	10 [m^3]

Tomado de *Diseño y análisis de un sistema pluvio-eléctrico adaptable a la región del Chocó biogeográfico colombiano* (p. 41), por M.Acosta, J.Díaz, Universidad Industrial de Santander.

Dichas características permiten un aprovechamiento energético eficiente del recurso hídrico, con un equilibrio entre la capacidad de almacenamiento y la frecuencia de operación. La turbina opera en ciclos intermitentes, regulados con sensores de nivel.

El dimensionamiento hidráulico el cálculo de la potencia hidráulica disponible, utilizando la siguiente ecuación:

$$P = \rho * g * Q * H \quad (1)$$

Donde:

ρ es la densidad del agua ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$),

g es la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$),

Q es el caudal ($10 \text{ L/s} = 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$),

H es la altura neta disponible (15m).

A partir de la cual se calcula una potencia teórica de aproximadamente:

$$P = 1,47 \text{ kW}$$

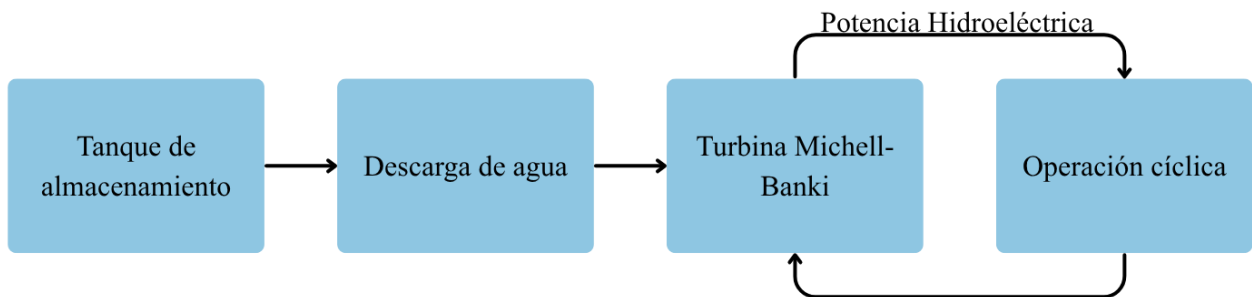
Lo anterior antes de pérdidas mecánicas, hidráulicas y eléctricas.

Para abastecer el flujo necesario para el funcionamiento, se estimó una disponibilidad diaria de agua de aproximadamente 72m^3 , lo que llevo a definir un tanque de 10 m^3 , operado en 7 ciclos diarios. Cada uno de estos ciclos de operación libera el contenido del tanque en un flujo de 10 L/s durante 16,7 minutos.

A continuación, se presenta un diagrama que ilustra el ciclo hidráulico

Figura 3

Ilustración del ciclo hidráulico



Elaboración propia

4.2 Proceso de selección de la turbina

La turbina seleccionada debe responder a las condiciones hidráulicas del sitio (caudal y altura disponible) para garantizar un desempeño eficiente. En el trabajo “Diseño y análisis de un sistema pluvio-eléctrico adaptable a la región del Chocó biogeográfico colombiano” se utilizó una metodología técnica soportada con cartas de selección (Ver la figura 2) que permiten determinar qué tipo de turbina es más adecuada para un sistema con base en las variables caudal (Q) y Altura (H), parámetros de velocidad específica y una comparación entre las alternativas más comunes en generación micro y pico.

Teniendo en cuenta las condiciones de caudal, altura y potencia del sistema presentadas en la Tabla 2. Encontramos que estos valores se encuentran en el rango de nano y pico de centrales hidroeléctricas, lo que reduce las opciones a aquellas turbinas que operan eficientemente en condiciones de bajo caudal y altura media.

Con ayuda de la carta de selección (Figura 2) se ubica el punto de operación y se determina el tipo de turbinas que se ajustan a él. Donde se descartan: La turbina Pelton, ya que, aunque opera

a caudales bajos, requiere saltos mayores a 50m. La turbina Francis, tiene eficiencia optima en alturas medias, pero con caudales mayores y, por último, la turbina Kaplan que es adecuada para bajos saltos, pero con caudales muy elevados.

Entonces, la opción técnicamente viable según la carta es la turbina Michell-Banki, la cual está diseñada para operar en el rango de 2 a 30m de altura y 5 a 100L/s de cauda, con eficiencias entre 70% y 84%, lo que la hace ideal para este proyecto de un sistema de generación a pequeña escala.

De la misma manera, se tiene en cuenta la velocidad especifica (N_s) que es un parámetro adimensional que permite identificar el mejor tipo de turbina que se adapta al diseño, relacionando la velocidad de rotación, la potencia generada y la altura disponible:

$$N_s = N \cdot \sqrt{\frac{P}{H^{5/4}}} \quad (2)$$

Donde:

N es la velocidad de rotación del eje de la turbina (rpm),

- P es la potencia hidráulica disponible (kW),
- H es la altura neta de la carga (m).

De acuerdo con las condiciones de diseño y una velocidad del eje de aproximadamente a 600 RPM, y mediante un análisis iterativo empleando las leyes de semejanza se determinó que la N_s del sistema es de 40.72, valor que se encuentra en un rango típico de operación de la turbina Michell-Banki según la siguiente tabla:

Tabla 3*Clasificación de una turbina según su N_s y N_q*

TIPO DE TURBINA	N_s	N_q
Pelton de una tobera	10 a 29	3 a 8
Pelton de dos o más toberas	29 a 59	8 a 18
Michell-Banki	29 a 220	8 a 68
Francis Lenta	59 a 124	18 a 38
Francis Normal	124 a 220	38 a 68
Francis Rápida	220 a 440	68 a 135
Hélice y Kaplan	342 a 980	105 a 300

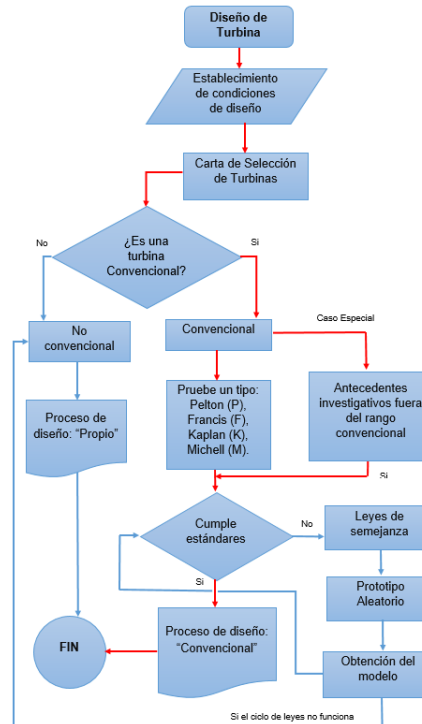
Tomado de *Diseño y análisis de un sistema pluvio-eléctrico adaptable a la región del Chocó biogeográfico colombiano* (p. 50), por M.Acosta, J.Díaz, Universidad Industrial de Santander.

Lo que respalda que respalda la elección previa basada en la carta de selección y a su vez, descarta otras alternativas como la turbina Pelton (N_s 10-29) o Kaplan ($N_s > 300$), cuyos valores están por fuera del rango operativo del sistema. Lo que confirma que la turbina Michell-Banki es una turbina técnicamente viable y eficiente para las condiciones de caudal y altura disponibles en el sistema propuesto.

El diagrama de flujo de proceso es el siguiente:

Figura 4

Diagrama de flujo del diseño de una turbina



Tomado de *Diseño y análisis de un sistema pluvio-eléctrico adaptable a la región del Chocó biogeográfico colombiano* (p. 53), por M.Acosta, J.Díaz, Universidad Industrial de Santander.

Finalmente, la selección de la turbina Michell-Banki también tuvo en cuenta otros aspectos como la adaptabilidad a variaciones de caudal, sin pérdida drástica de rendimiento, la construcción sencilla y el bajo costo de manufactura y la facilidad de mantenimiento.

4.3 Diseño físico del sistema

El sistema de generación propuesto se compone de varios subsistemas diseñados para operar de forma integrada y eficiente. A partir del diseño original del proyecto anteriormente mencionado, se adaptaron y detallaron algunos componentes con el objetivo de ser implementados en un banco de pruebas de laboratorio. A continuación, se describen sus partes principales.

4.3.1 Diseño de la turbina Michell-Banki

En primer lugar, se desarrolló el diseño y la construcción de la turbina Michell-Banki basado en los apuntes para un manual técnico de diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE)(Organización Latinoamericana de Energía, n.d.), así como de ecuaciones y conceptos en el proyecto de grado “Diseño y construcción de una turbina hidráulica Michell-Banki para el laboratorio de turbomaquinas hidráulicas de la UIS”(Romero et al., 2020b). Se establecieron algunos parámetros que representan conceptos básicos para el desarrollo del diseño, los cuales son:

$$Q = 10 \frac{L}{s} = 0.010 \frac{m^3}{s}$$

$$H_N = 15 \text{ m}$$

$$D_E = 0.20 \text{ m}$$

$$N < 1000 \text{ rpm}$$

Teniendo en cuenta que no son parámetros definitivos, son indicadores que permiten evidenciar la veracidad de los cálculos del sistema.

Para el diseño del rodete de la turbina, se consideraron las velocidades absolutas (C), relativas (W) y tangenciales (U), estandarizando los ángulos de entrada y de salida para optimizar el rendimiento. El ángulo de entrada al rodete fue de 16° un valor que ha sido comprobado experimentalmente como óptimo para este tipo de diseños. El tipo de rodete es cilíndrico, con álabes curvos distribuidos radialmente, especiales para que el flujo atraviese dos veces el conjunto de álabes como es característico de una turbina Michell-Banki.

También, se verificaron los esfuerzos en los alabes, considerando el momento flector y el esfuerzo de fluencia del material, el cual es acero estructural. Teniendo en cuenta que el valor del

esfuerzo máximo obtenido debe ser menos al esfuerzo máximo del material, así como el esfuerzo máximo soportado debe ser menor a 1,5 veces el esfuerzo de fluencia del material.

Así mismo, se calcula el espesor y espaciamento de los álabes a partir del perímetro externo e interno, obteniendo una distribución adecuada para la transferencia de energía. En cuanto a los discos laterales que se encuentran en el exterior de la turbina, se calcularon para soportar las fuerzas centrífugas y de impacto del flujo.

Los resultados que se obtuvieron en el diseño del rodete fueron los siguientes:

Tabla 4

Resultados del diseño del rodete de la turbina Michell-Banki

Parámetro	Símbolo / Unidad	Valor
Diámetro externo del rodete	De [mm]	164.94
Diámetro interno del rodete	Di[mm]	94.02
Ancho del rodete	B [mm]	66.00
Número de alabes	N	32
Espesor de los alabes	[mm]	2.00
Separación entre alabes	[mm]	4.23
Velocidad de entrada del flujo	C1[m/s]	16.88
Ángulo de entrada	α [°]	16.00
Velocidad tangencial del rodete	U [m/s]	10.87
Velocidad relativa en entrada	W1 [m/s]	10.15
Velocidad relativa en salida	W2 [m/s]	5.86
Eficiencia hidráulica estimada	η_h [%]	82.50

Elaboración propia

Para el diseño del eje se consideraron las fuerzas ejercidas por el rodete y los rodamientos, en el proceso se evaluaron momentos flectores y torsionales para garantizar que la transmisión del par no excediera los límites del material seleccionado. Este análisis incluyendo la verificación de esfuerzo admisible y factor de seguridad. Los resultados en la Tabla 5.

Tabla 5

Resultados del diseño del eje de la turbina Michell-Banki

Parámetro	Símbolo / Unidad	Valor
Diámetro del eje	d[mm]	25.4 (1 pulgada)
Material del eje	—	Acero estructural
Esfuerzo de fluencia del material	σ_y [MPa]	250
Esfuerzo máximo combinado (flexión + torsión)	σ_{max} [MPa]	88.5 (valor típico estimado)
Torque transmitido	T [N·m]	18.6
Momento flector máximo	Mf [N·m]	22.5
Factor de seguridad aplicado	Fs	≥ 2.5

Elaboración propia

Posteriormente, el diseño del inyector cuya función principal es transformar la presión estática a presión dinámica o de velocidad. Es una pieza fundamental para el funcionamiento de la turbina, ya que no solo acelera el flujo de agua, sino que aprovecha al máximo la energía del fluido. Para el desarrollo se definieron sus dimensiones clave: ancho, espesor, número de álabes y radios de curvatura, así como el cálculo de los esfuerzos en las paredes del inyector y los álabes modelados como vigas sometidas a carga distribuida. En la Tabla 6 se encuentran los resultados del diseño del inyector de la turbina Michell-Banki.

Tabla 6

Resultados del diseño del inyector de la turbina Michell-Banki

Parámetro	Símbolo / Unidad	Valor
Caudal de diseño	Q [L/s]	10
Ancho del inyector	B [mm]	66
Altura de salida del chorro	h[mm]	25
Espesor del canal de salida	[mm]	2.5
Número de alabes del inyector	—	6
Radio de curvatura de los alabes	[mm]	30
Ángulo de entrada del flujo	α [°]	16
Coefficiente de velocidad del chorro	C_v	0.97
Velocidad estimada de salida	V [m/s]	16.88

Esfuerzo máximo en los alabes (curvos + rectos)	σ_{\max} [MPa]	122.3
Esfuerzo de fluencia del material (acero)	σ_y [MPa]	250
Factor de seguridad	F_s	≥ 2.0

Elaboración propia

5. Diseño del sistema hidráulico

Para la conformación del banco de laboratorio es necesario de un diseño hidráulico que determine la cantidad de energía disponible para ser posteriormente transformada por el sistema turbina-generador. Este diseño comprende desde la caracterización de las condiciones de entrada, caudal y altura neta hasta la definición geométrica de los componentes de conducción y almacenamiento.

Se tiene en cuenta que las condiciones van a estar controladas en el laboratorio sin dejar de lado los criterios técnicos válidos para aplicaciones reales, se estudiaron aspectos como las pérdidas por fricción en tuberías, accesorios, comportamiento del flujo, dimensionamiento de los depósitos y tiempo de operación por ciclo. Lo anterior, garantizando la operación del sistema en intervalos regulares.

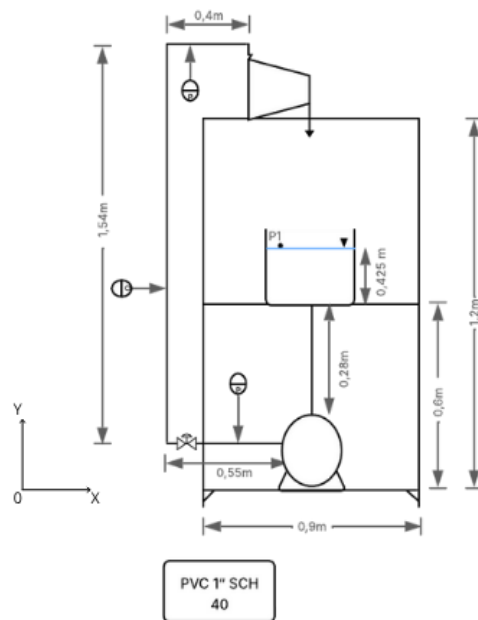
Con base a diferentes principios de mecánica de fluidos, empleando ecuaciones como la de Bernoulli, Darcy- Weisbach, entre otras, se realizaron los cálculos. Los resultados obtenidos permitieron definir parámetros de diseño que aseguran un funcionamiento estable, eficiente y seguro para fines académicos y experimentales.

5.1 Diagrama hidráulico del sistema

En la Figura 5 se presenta el diagrama hidráulico diseñado para el banco de pruebas de laboratorio. Este esquema representa el ciclo completo de circulación del agua, desde el almacenamiento hasta la descarga, incluyendo todos los elementos de conducción, como tuberías y válvulas, así como los dispositivos de conversión de energía, como la turbina y la bomba. Este diseño cuenta con sensores de presión y de caudal que garantizan un control preciso, lo que asegura un funcionamiento óptimo para el funcionamiento del banco.

Figura 5

Diagrama hidráulico del banco de laboratorio



Elaboración propia

El circuito hidráulico está compuesto por:

- **Tanque:** Su función es almacenar el volumen necesario para alimentar cada ciclo de operación, cumpliendo con los requerimientos del sistema.

- **Tuberías y accesorios:** De PVC de 1" SCH 40, transporta el caudal hasta la turbina. La longitud y disposición fueron definidas según las dimensiones del banco y las condiciones del caudal. Los accesorios, como codos, uniones y válvulas, están diseñados para mantener la integridad del flujo y facilitar el montaje y mantenimiento del sistema.
- **Indicadores de presión y caudal:** Instalados en puntos estratégicos de la tubería, para permitir medir las variables en diferentes puntos del sistema, los sensores de presión monitorean las diferencias de presión en tramos clave, mientras que los medidores de caudal registran el volumen de agua que circula por el sistema, facilitando la realización de diferentes pruebas en el laboratorio.
- **Válvula de regulación:** Permite regular el caudal que entra a la turbina, controlando la potencia hidráulica disponible. Su diseño garantiza una respuesta rápida y precisa, facilitando la variación del flujo sin generar perturbaciones significativas en el sistema.
- **Canal de retorno o descarga:** Conduce el agua de la turbina al tanque de almacenamiento para que el ciclo se repita bajo las condiciones de laboratorio.
- **Turbina Michell-Banki:** Encargada de transformar la turbina hidráulica en energía mecánica, acoplada directamente al generador.
- **Bomba hidráulica:** Garantiza la operación continua del banco, recirculando el agua descargada por la turbina.

5.2 Cálculos hidráulicos

Los cálculos hidráulicos comienzan con la aplicación de la ecuación de Bernoulli, ya que esta ecuación permite relacionar las diferentes formas de energía, tales como la energía potencial, la energía cinética la presión a lo largo del ciclo hidráulico. Se parte de una condición inicial en la que se encuentra el tanque abierto con una $P_1 = P_{atm}$. Este punto se toma como referencia para establecer la línea de energía disponible en el sistema. A partir de esta referencia, se determina la altura neta de la entrada de la turbina, y se evalúan las pérdidas por fricción y otros factores que afectan la eficiencia del sistema.

De esta manera, entre el punto 1 y el punto 2 (entrada a la turbina), se expresa la ecuación de Bernoulli así:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_B - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (3)$$

Donde:

- $P_1 = P_{atm}$, presión en el tanque abierto.
- $Z_1 = 1,025$, altura geométrica del nivel de agua en el tanque respecto al 0 de referencia.
- $V_1 \approx 0$, velocidad despreciable en la superficie del tanque.
- V_2 , velocidad del agua a la entrada de la turbina.
- P_2 , presión en la entrada de la turbina.
- $Z_2 = 1,5$, cota de la turbina a la entrada con respecto al 0 de referencia.
- h_L , pérdidas distribuidas en tubería.
- h_B , energía entregada por la bomba.

A partir de las consideraciones anteriores, y teniendo en cuenta que la presión absoluta se define como $P_{abs} = P_{atm} + P_{man}$, la ecuación se simplifica de la siguiente manera:

$$Z_1 + h_B - h_L = \frac{V_2^2}{g} + Z_2 \quad (4)$$

Reemplazando:

$$1,025m + h_B - h_L = \frac{V_2^2}{2g} + 1,5m \quad (5)$$

Según los datos de la Tabla A.1 (Properties of Water)(Munson et al., 2013), se obtienen las condiciones del fluido, las cuales son:

- Peso específico del agua, $\gamma_{agua} = 9,79 \text{ KN/m}^3$
- Temperatura del agua, $T_{agua} = 20^\circ\text{C}$
- Densidad del agua, $\rho_{agua} = 998 \text{ kg/m}^3$
- Viscosidad dinámica del agua, $\mu_{agua} = 1,02 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Asimismo, en la Tabla G.3 (Dimensions of PVC Plastic Pressure Pipe)(Munson et al., 2013) se encuentran las características de la tubería PVC 1" SCH 40:

- Diámetro interno de la tubería, $\varnothing_{int} = 27,2 \text{ mm}$
- Área de la tubería, $A = 5,811 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
- Presión máxima admitida por la tubería, $P_{rating} = 16 \text{ bar}$
- Caudal máximo entregado por la bomba, $Q_{m\acute{a}x} = 85 \text{ l/min}$

Para iniciar los cálculos, se determina la velocidad utilizando los datos del caudal máximo $Q_{m\acute{a}x}$ y el área A de la tubería.

$$Q_{m\acute{a}x} = V_2 \cdot A \quad (6)$$

$$V_2 = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{A} \quad (7)$$

$$V_2 = \frac{1,42 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{5,811 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$V_2 = 2,438 \text{ m/s}$$

Después de calcular la velocidad V_2 , se determina el número de Reynolds para identificar el tipo de flujo con el que se trabajará.

$$N_r = \frac{\phi \cdot V_2 \cdot \rho}{\mu_{\text{agua}}} \quad (8)$$

$$N_r = \frac{0,0272 \text{ m} \cdot 2,438 \text{ m/s} \cdot 998 \text{ kg/m}^3}{1,02 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}}$$

$$N_r = 64880,9$$

Según el libro Mecánica de fluidos (Çengel & Cimbala, 2006) los fluidos se caracterizan como turbulentos si su número de Reynolds es mayor a 4000, como en este caso.

Por otro lado, el cálculo de las pérdidas en tuberías se realiza con la ecuación Darcy-Weisbach, de la siguiente manera:

$$h_L = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V_2^2}{2g} + h_m \quad (9)$$

Donde:

- h_L = pérdidas de carga por fricción [m]
- f = factor de fricción de Darcy
- L = longitud de la tubería [m]
- D = diámetro interno de la tubería [m]
- V_2 = velocidad del flujo [m/s]

- g = aceleración de la gravedad
- h_m = pérdidas en accesorios

Para desarrollar la Ecuación 9, es necesario calcular el factor de fricción de Darcy f , que se obtiene así:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{(N_r)^{0,9}} \right) \right]} \quad (10)$$

Donde:

- f , factor de fricción de Darcy, adimensional.
- ε , rugosidad absoluta de la tubería [m]. Para tuberías de PVC, un valor típico es $\varepsilon=1.5 \times 10^{-6}$ m (White & Klein, 2011).
- D , diámetro interno de la tubería [m].
- N_r , número de Reynolds, adimensional.

Para obtener un factor de fricción, $f=1.964662578 \times 10^{-2}$.

Se debe calcular las pérdidas en accesorios, que corresponden a la segunda parte de la Ecuación 9.

$$h_m = \sum K \cdot \frac{V_2^2}{2g} \quad (11)$$

Donde:

- K , coeficiente de pérdida de cada uno de los accesorios.

$$K = \frac{L_e}{D} \cdot f_t \quad (12)$$

- L_e , longitud equivalente de tubería recta que produciría la misma pérdida que el accesorio [m].

- D, diámetro interno de la tubería [m].
- f, factor de fricción de Darcy.
- V_2 , velocidad del flujo [m/s].
- g, aceleración de la gravedad.

En este caso, los accesorios de este sistema y el cálculo final del coeficiente K (*Flow of Fluids through Valves, Pipes, Pumps and Fittings*, 2018) se encuentran en la Tabla 7.

Tabla 7

Coeficientes de pérdida de los accesorios del sistema

Accesorios	Cantidad	$\frac{L_e}{D}$	f	K
Entrada	1	-	-	0,78
Salida	-	-	-	0
Codos	3	30	0,022	1,98
Válvula de globo	1	340	0,022	7,48
Tee	2	20	0,022	0,88
Caudalímetro	1	50	0,022	1,1

Elaboración propia

Se realiza la sumatoria de K para hallar las pérdidas en accesorios h_m del sistema.

$$\sum K = 0,78 + 0 + 1,98 + 7,48 + 1,1 + 0,88 = 12,22$$

Para que h_m sea:

$$h_m = 12,22 \cdot \frac{(2,438 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$h_m = 3,7020m$$

Reemplazando en la Ecuación 9, se tiene que:

$$h_L = 1,965 \times 10^{-2} \cdot \frac{2,97m}{0,0272m} \cdot \frac{(2,437911 \text{ m/s})^2}{2(9,81)} + 3,7020m$$

$$h_L = 4,351960m \approx 4,4m$$

Con los valores de pérdidas h_L y de velocidad calculados, reemplazando en la Ecuación 5, se calcula la energía entregada por la bomba h_B .

$$h_B - h_L = \frac{V_2^2}{2g} + 0,475m$$

$$h_B = \frac{(2,438 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} + 0,475m + 4,4m$$

$$h_B = 5,18m$$

Por último, se tiene el cálculo de la potencia de la bomba, este es el valor mínimo necesario para que hidráulicamente se realice un ciclo completo.

$$P_B = h_B \cdot \gamma \cdot Q \quad (13)$$

Donde:

- P_B , potencia de la bomba.
- h_B , energía entregada por la bomba.
- γ_{agua} , peso específico del agua.

$$P_B = 5,18m \cdot 9,79 \text{ kN/m}^3 \cdot 1,42 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P_B = 0,0720 \text{ Kw} \approx 0,1 \text{ Kw}$$

Con base en los cálculos hidráulicos realizados anteriormente, se calculan las RPM de salida de la turbina a partir de la velocidad en el punto 2, que corresponde a la velocidad del chorro libre a la salida de la tubería.

Para determinar las RPM de la turbina, se requieren los datos proporcionados por la bomba, la cual se selecciona según el caudal necesario para generar la energía requerida para el funcionamiento del tablero eléctrico y sus accesorios. Además, se considera la condición de que la bomba sea monofásica a 110 V.

La selección de la bomba se realizó mediante un proceso iterativo, cuyo objetivo era alcanzar unas RPM que permitieran el buen funcionamiento del alternador. Se concluyó que el caudal requerido debía estar en el rango de 120 a 160 L/min.

Del dato anterior, con el caudal máximo necesario (160L/min) se tiene se calcula la velocidad absoluta a la entrada del rodete V_e , con la ecuación 7, donde:

$$V_t = \frac{2.66 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}}{5,107051 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$V_t = 5,22 \text{ m/s}$$

Partiendo de la relación entre la velocidad absoluta y la velocidad tangencial, presentada en el trabajo “Diseño y análisis de un sistema pluvio-eléctrico adaptable a la región del Chocó biogeográfico colombiano”, se calcula la velocidad tangencial del rodete de la siguiente manera:

$$U = V_t \cdot k \cdot \cos \alpha \quad (14)$$

Donde:

- k , coeficiente de velocidad tangencial óptimo para una turbina Michell-Banki(OLADE, 1983).
- α , ángulo de inyección, en este caso 16° .

- U, velocidad tangencial del rodete.

$$U = 5,221546 \cdot 0,5 \cdot \cos 16$$

$$U = 2,51 \text{ m/s}$$

Lo anterior para finalmente encontrar las RPM de la turbina con una ecuación en función del diámetro del rodete.

$$N = \frac{60 \cdot U}{\pi \cdot D} \quad (15)$$

Donde:

- N, RPM de la turbina.
- D, diámetro del rodete.

$$N = \frac{60 \cdot 2,51 \text{ m/s}}{\pi \cdot 0,16\text{m}}$$

$$N = 290,48 \text{ RPM}$$

Con esto, se determina que las RPM de la turbina son 290,48. Este valor es adecuado, ya que al acoplar un sistema de transmisión se logra alcanzar las RPM necesarias para el correcto funcionamiento del alternador y, por ende, la generación eficiente de energía.

6. Diseño eléctrico

Para el diseño del sistema eléctrico que acompaña al banco de generación, se estableció un alcance que inicia en el suministro de potencia, comprendiendo el cableado de alimentación desde la salida del alternador hasta la protección principal monofásica a 110 V ubicada en el tablero eléctrico. A partir de este punto, el sistema se proyecta desde la protección hacia el bloque de distribución, el cual se encarga de repartir la energía tanto hacia las cargas a 110 V como hacia la fuente de conversión de 110 VAC a 12 VDC. Desde esta fuente, se alimentan directamente los

equipos electrónicos de baja tensión continua, entre los que se incluyen pilotos luminosos y salidas previstas para futuras expansiones del banco.

El dimensionamiento del sistema se realizó considerando, en primer lugar, la demanda de carga proyectada, obtenida a partir de un cuadro de consumos (Apéndice A) elaborado con los equipos y periféricos a integrar, y, en segundo lugar, la capacidad de generación disponible. En el cuadro de cargas se identifican los diferentes componentes que forman parte del tablero eléctrico, los cuales requieren un suministro continuo de potencia, junto con los periféricos externos que se busca energizar a partir de la generación, tales como dispositivos enchufables de uso cotidiano.

Para la selección de la mejor alternativa para el alternador en el proyecto, se desarrolló una matriz QFD que compara generadores de corriente continua (DC) y de corriente alterna (AC). En esta matriz, se consideraron tanto los requerimientos funcionales como los del usuario final, asignando a cada uno de ellos una importancia y un peso relativo adecuados. Se asignaron calificaciones de 0, 1, 3 y 9, donde 0 indica que no existe correlación, mientras que 9 refleja una relación muy estrecha. La matriz QFD se encuentra en el Apéndice B.

Para la selección de la mejor alternativa en el proyecto, se desarrolló una matriz QFD que compara generadores de corriente continua (DC) y de corriente alterna (AC). En esta matriz, se consideraron tanto los requerimientos funcionales como los del usuario final, asignando a cada uno de ellos una importancia y un peso relativo adecuados. Se asignaron calificaciones de 0, 1, 3 y 9, donde 0 indica que no existe correlación, mientras que 9 refleja una relación muy estrecha.

Tabla 8

Resultados Matriz QFD

Criterio de Evaluación	Sistema Selección de Alternativas				
		Generación DC		Generación AC	
Eficiencia Energética	27%	3	0,81	3	0,81
Material	25%	1	0,25	3	0,75
Factor de Seguridad Fiable	24%	2	0,48	3	0,72

Seguridad ante falla Humana	24%	3	0,72	3	0,72
Totales	100%	Promedio	2,26	Promedio	3

Elaboración propia

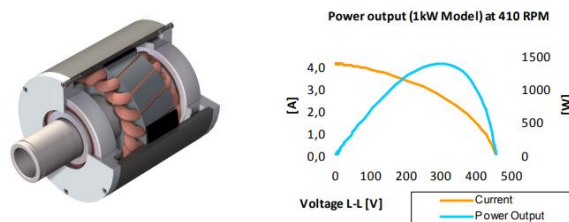
Los resultados de la matriz indican que, si bien ambos tipos de generadores cumplen con varios criterios, el generador de corriente alterna (AC) sobresale en áreas clave como la fiabilidad, en el tipo de material y la eficiencia energética. Estas características, posicionan al generador AC como la mejor alternativa para llevar a cabo el proyecto. Además, se muestra que la generación AC ofrece un rendimiento más competitivo en los aspectos que son críticos para el éxito del diseño.

6.1 Cálculo conductor de alimentación

Inicialmente se plantea el diseño del sistema de alimentación de potencia desde el alternador hasta la protección principal. Para esta etapa, el aspecto más crítico es el dimensionamiento del conductor de potencia para la tensión de trabajo; la tensión empleada será 110 VAC, valor obtenido a partir del catálogo del alternador (Alte, 2023). Dicha selección del alternador permite, a su vez, definir la capacidad del sistema y los parámetros eléctricos necesarios para el cálculo del conductor.

Figura 6

Alternador Mecc Alte Eogen



Tomado de Eogen: *Electronic Generator Controller* (Mecc Alte, 2023).

<https://www.meccalte.com/downloads/eogen.pdf>

Analizando la tensión de trabajo medida en voltios, según la gráfica del fabricante, se observa que para una tensión de 110 V el alternador entrega una potencia nominal en el rango de 900 a 1000 W. Este valor es completamente favorable, dado que el cuadro de consumos estimado corresponde aproximadamente al 50% de la potencia nominal disponible, lo que permite holguras en el sistema y capacidad confiable.

A partir del dato obtenido gracias a la selección del alternador, se procede a calcular todos los parámetros de diseño requeridos para el cálculo final del conductor, y para esto vamos a tomar como referencia a la NEC 2023 donde nos indica en artículos el paso a paso a seguir y recomendaciones de diseño.

Para la corriente base de diseño se sigue los pasos vistos en la NEC Art. 210.19(A)(1) y 215.2(A)(1)(National Fire Protection Association, 2023), el cual indica que los conductores deben dimensionarse a partir de la carga prevista, es decir, la carga a instalar siempre en condiciones de operación no continua. Además, como el fabricante no especificó el factor de potencia, se asume un valor típico de 0,9, el cual es común en motores eléctricos comerciales.

$$I_b = \frac{\text{Potencia prevista o total [W]}}{\text{Tensión [V]} * \text{Factor de potencia}} \quad (16)$$

$$I_b = \frac{1000 [W]}{110 [V] * 0,9}$$

$$I_b = 10,101 [A]$$

Como la operación es no continua, la corriente base es la misma obtenida en el cálculo. Si fuese continua, es decir más de 3 horas de operación continua, la NEC exige un sobredimensionamiento del 125% del valor de la corriente base.

Para la selección preliminar del calibre del conductor según la Tabla 310.16 del Artículo 310 de la NFPA 70: National Electrical Code (National Fire Protection Association, 2023), en la

cual se especifica la capacidad de conducción de corriente según el material, el aislamiento y la temperatura máxima de operación.

Considerando que el conductor seleccionado es de cobre con aislamiento de 90 °C, se determina el calibre mínimo requerido en función de la corriente de diseño previamente calculada.

Calibre Seleccionado para 15A MAX → 14 AWG; Cobre – 90 °C.

Ya teniendo los calibres de los conductores principales en este caso Fase más Neutro, se debe calcular el conductor del sistema puesta a tierra, para ello se debe calcular la protección de sobretensión, que para los amperios nominales máximos del conductor sería suficiente una protección de 15A, ya que, la máxima corriente que pasa por el conductor es de 10,1 A. De acuerdo con la Tabla 250.122 de la NEC 2023(National Fire Protection Association, 2023), el dimensionamiento del conductor de puesta a tierra depende de la corriente nominal del dispositivo de protección contra sobrecorriente. En este caso, al contar con una corriente de diseño cercana a 15 A, el EGC mínimo requerido corresponde a un conductor de cobre AWG 14, es decir igual que los calibres para la fase y neutro.

Finalmente se recomienda analizar el nivel o porcentaje de caída de tensión, pero para este caso contamos con que la acometida de alimentación va a tener menos del 3% de pérdidas por tensión, debido a que la distancia del conductor desde la salida hasta la protección es muy pequeña y no afecta directamente dichas pérdidas, asegurando el límite requerido por NEC Anexo D, ejemplo D3 y Fine Print Note del Art 210.19(A)(1) y 215.2(A)(1)(National Fire Protection Association, 2023).

Resistencia Conductor de Cobre #14AWG = 0,008286 Ω

$$R_{total} = R_{Conductor} * 2 * (Longitud de conductor) \quad (17)$$

$$R_{total} = 0,008286 \Omega * 2 * (2)$$

$$R_{total} = 0,03314 \Omega$$

$$I = 10,101 A$$

$\Delta V \rightarrow$ *Caida de tensión Absoluta*

$$\Delta V = I * R \quad (18)$$

$$\Delta V = 10,101A * 0,03314 \Omega$$

$$\Delta V = 0,33479 V$$

$$\Delta V\% = \frac{0,33479 V}{110 V} = 0,30\%$$

Con el dimensionamiento del conductor principal, pasamos al cálculo del conductor que está aguas debajo de la protección, es decir el que va desde el breaker principal hasta el barraje o puente de distribución a 110V. Para este conductor hacemos una relación 1:1 con el conductor de entrada, ya que la capacidad de amperios de entrada es la misma que de salida.

Calibre Conductor de entrada \leftrightarrow Calibre Conductor de salida.

14 AWG Fase + Neutro + Tierra

6.2 Dimensionamiento del tablero eléctrico

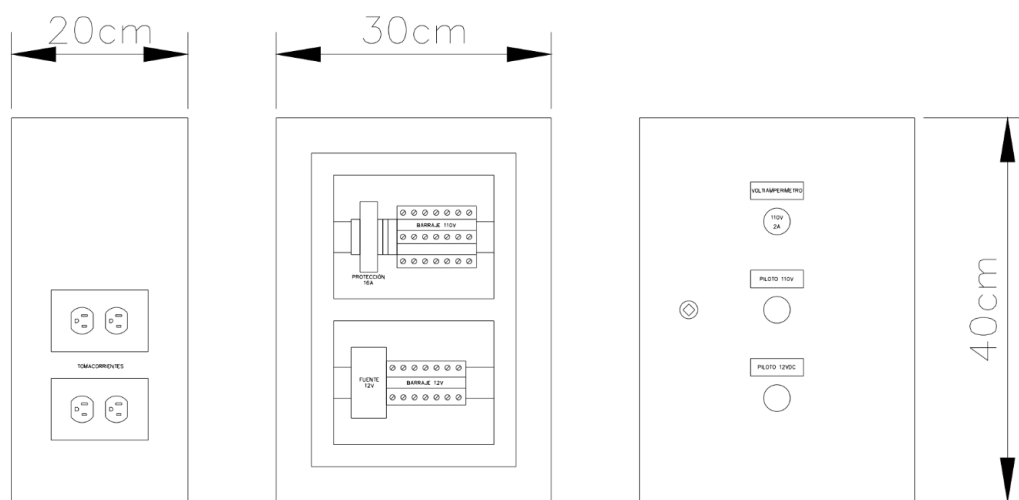
Para el dimensionamiento del tablero, inicialmente se requieren las dimensiones aproximadas de los elementos interiores o un listado detallado de materiales internos con sus dimensiones y accesorios. Con esa información se determina el espacio mínimo del tablero, las zonas de montaje en riel DIN, puentes de distribución de barrajes y los espacios mínimos de seguridad para la correcta realización. Y adicional se organizan dichos materiales en un diseño de distribución interna del tablero eléctrico. El listado de materiales se encuentra en el Apéndice C.

Tras el análisis del listado de materiales, se procede a un proceso de dimensionamiento orientado a definir la correcta distribución de espacios y la ubicación de los equipos internos dentro

del tablero eléctrico. Esto permite establecer de manera precisa el espacio mínimo requerido y, así mismo, las dimensiones finales del tablero como se muestra a continuación con un diagrama interno del cofre.

Figura 7

Distribución interna tablero eléctrico



Elaboración propia

Con la ayuda del software CAD de Autodesk (AutoCAD), se determinó que la configuración más adecuada del espacio interno del tablero corresponde a la distribución presentada en la Figura 7, la cual asegura un orden funcional y seguro de los componentes. En el primer nivel se ubican los elementos asociados al circuito de 110 V, mientras que en un segundo nivel inferior se disponen el bloque de distribución y la fuente de 12 V, ambos montados sobre riel omega DIN para garantizar facilidad de fijación y mantenimiento. Adicionalmente, en la puerta del tablero se instalaron dos pilotos luminosos como indicadores de operación: uno para señalar la presencia de tensión generada a 110 V y otro para la tensión de 12 V proveniente de la fuente, lo que permite inspeccionar el funcionamiento del sistema sin tener que abrir el cofre y poner en riesgo la seguridad del estudiantado. Sobre estos se localiza un panel multímetro, encargado de

registrar en tiempo real los valores de tensión y corriente consumidos por el sistema, lo que permite una supervisión práctica y real del banco de pruebas.

Tabla 9

Dimensiones finales del tablero eléctrico

Dimensiones finales del tablero eléctrico	
Ancho	300 mm
Alto	400 mm
Profundo	200 mm

Elaboración propia

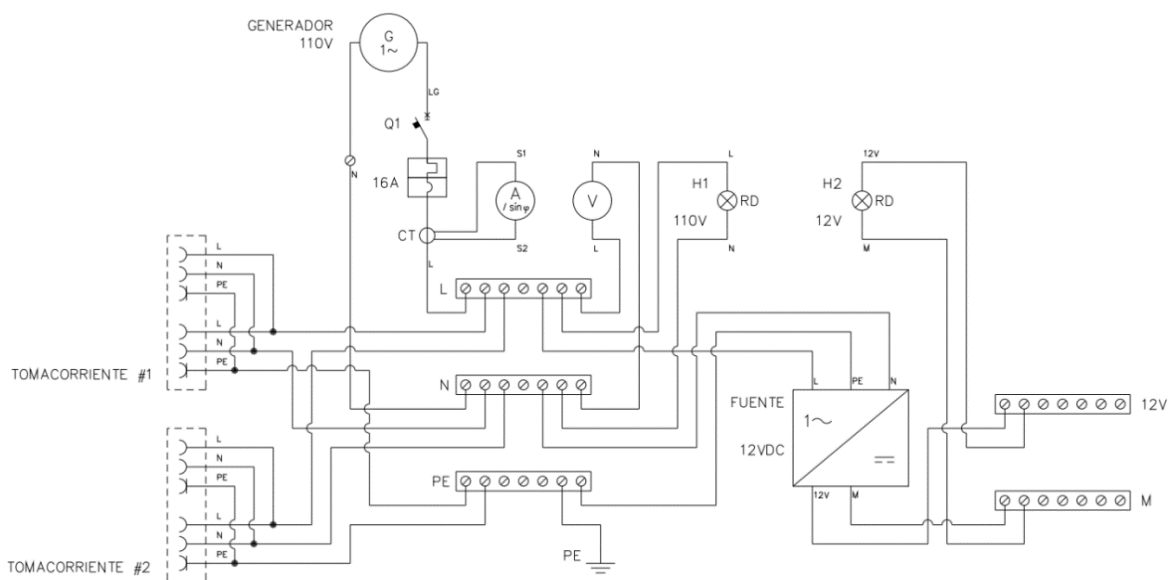
A partir de dicha configuración, se elabora un diagrama de conexiones que funciona como guía instructiva para la realización de las conexiones eléctricas internas del tablero. Este diagrama cumple la función de un plano unifilar, ofreciendo un nivel de detalle mayor y una mejor ejemplificación del sistema de conexiones, para que su desarrollo y cableado sea lo más preciso posible.

Según el artículo 20.5 del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE, en su artículo 20.5 (Ministerio de Minas y Energía, 2013) referente a tableros eléctricos, estos deben diseñarse y fabricarse garantizando espacio suficiente para la correcta instalación, operación y mantenimiento de los equipos, así como permitir la disipación térmica natural o, en caso necesario, contar con ventilación adecuada, donde en este caso en específico no es requerido por el bajo consumo y espacio disponible.

Igualmente, el artículo 28.4 (Ministerio de Minas y Energía, 2013) establece que frente a tableros con tensión mayor a 50 V debe disponerse un espacio libre mínimo de 1,0 m de profundidad, con ancho equivalente al del tablero y una altura no menor de 2,0 m, asegurando así condiciones seguras de acceso y maniobra. Así mismo, se obliga y requiere que tanto el cofre metálico, es decir la estructura del tablero, se encuentre certificada bajo la norma RETIE, como también debe estar certificado los componentes eléctricos internos que lo requieran según el reglamento nacional.

Figura 8

Diagrama plano de conexiones eléctricas y electrónicas de tablero.



Elaboración propia

Se recomienda que la instalación de la tierra que se use de forma general para todo el sistema esté equipotencializada con la del edificio o, en su defecto, con la del laboratorio o salón donde se ubique el banco. Esta conexión puede realizarse desde el tablero de distribución o desde un punto de tierra cercano, mediante un empalme con la tierra de un tomacorriente u otro similar.

7. Diseño de la transmisión mecánica

7.1 Cálculo del sistema de transmisión

Para la transmisión se ha dispuesto un sistema sencillo por poleas, es decir, que solo posee una polea conductora y una sola conducida, en el cual se establece de manera preliminar una relación de transmisión de 1,5:1, con el fin de garantizar el régimen de giro requerido en el generador. De igual manera, se plantea el cálculo y desarrollo correspondiente de los diámetros de las poleas, de modo que se cumpla con la relación de velocidades determinada.

$$\frac{N_{alternador}}{N_{turbina}} = \frac{D_{turbina}}{D_{alternador}} \quad (19)$$

$$\text{Relación de transmisión} = 1,5:1 = i$$

$$\frac{N_{alternador}}{N_{turbina}} = i$$

A partir de la relación de transmisión definida, se establece que la velocidad de rotación a la salida de la turbina, según lo obtenido en el diseño hidráulico previo, corresponde a 290,49 rpm.

$$\frac{N_{alternador}}{290,4879 \text{ RPM}} = 1,5$$

$$N_{alternador} = 435,73185 \text{ RPM}$$

El sistema con la relación de transmisión propuesta cumple de manera adecuada, presentando una velocidad nominal un poco mayor a la requerida en la polea del generador, que debe ser, como mínimo, de 410 rpm en su eje.

Adicionalmente, es necesario cumplir con la misma relación en los diámetros nominales de las poleas. En este sentido, el alternador ya dispone de una polea propia de 120 mm de diámetro, la cual puede considerarse como punto de partida para el dimensionamiento de la polea correspondiente en el eje de la turbina.

$$\frac{D_{turbina}}{D_{alternador}} = 1,5$$

$$D_{alternador} = 12 \text{ cm}$$

$$D_{turbina} = 1,5 * 12 \text{ cm}$$

$$D_{turbina} = 18 \text{ cm}$$

Definidas las dimensiones de las poleas, se procede a la elección de la correa. Para este caso se selecciona una correa trapezoidal en V, ya que la polea del alternador está diseñada para este perfil. Además, las correas en V son apropiadas para aplicaciones de potencias reducidas y velocidades de rotación moderadas.

La disposición inicial del sistema establece que la distancia entre centros de las poleas debe ser igual a la suma de sus radios, más una separación adicional de aproximadamente 15 cm que garantiza el recorrido libre de la correa. Esta disposición sirve para poder dimensionar la correa del sistema. La longitud aproximada de la correa en una transmisión abierta puede calcularse con la expresión propuesta en el libro “Diseño de elementos de máquinas”. (Mott, 2006)

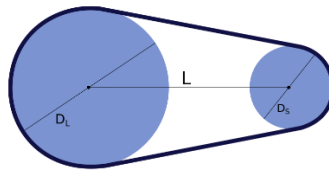
$$L \approx \pi \frac{D_{turbina} + D_{alternador}}{2} + 2C + \frac{(D_{turbina} - D_{alternador})^2}{4C} \quad (20)$$

L=LONGITUD DE CORREA

C= Longitud entre centros de poleas que sería Radio turbina+ Radio alternador+ distancia de separación.

Figura 9

Sistema de poleas



Esquema del sistema de poleas con correa, tomado de “Calculadora de longitud de correa”, (Calculator, 2025). Recuperado de <https://www.omnicalculator.com/es/fisica/calculadora-de-longitud-de-correa>

Reemplazando:

$$L \approx \pi \frac{180\text{mm} + 120\text{mm}}{2} + 2 * (300\text{mm}) + \frac{(180\text{mm} - 120\text{mm})^2}{4 * (300\text{mm})}$$

$$L \approx 1074,2388 \text{ mm}$$

Este cálculo, aunque aproximado, resulta suficientemente preciso para establecer la medida requerida y avanzar con el proceso de selección de la correa.

7.2 Cálculos de potencia

La potencia real del sistema se obtiene directamente de la potencia disponible en el fluido, es decir, de la energía hidráulica que ingresa a la turbina Michell-Banki, la cual se tienen los datos reales a partir de las condiciones del fluido y de las características de la bomba.

$$Pot_{fluido} = Q * H * \gamma$$

$$Pot_{fluido} = 0,0026667\text{m}^3/\text{s} * 18\text{m} * 9,79 \text{ kN}/\text{m}^3$$

$$Pot_{fluido} = 0,469 \text{ Kw}$$

La eficiencia típica de una turbina Michell-Banki, depende de varios factores como la relación entre el caudal de operación y el nominal, el salto hidráulico disponible, así como aspectos de diseño. De acuerdo con el estudio Optimization of the Efficiency of a Michell-Banki Turbine through the Variation of its Geometrical Parameters using a PSO Algorithm (Perez-Rodriguez et al., 2021), la eficiencia de este tipo de turbinas suele encontrarse en un rango de 70–85 %.

Por lo tanto, la potencia disponible en el fluido no puede considerarse igual a la potencia entregada por la turbina, ya que en el sistema se presentan pérdidas que afectan directamente la potencia de salida.

$$Pot_{Turbina} = Pot_{fluido} * 0,85$$

$$Pot_{turbina} = 0,39 Kw$$

Teniendo en cuenta las pérdidas asociadas a la transmisión por poleas que según la literatura son del 95% (Mott, 2006) y considerando una eficiencia promedio del generador del 92 %, según especificaciones del fabricante, es posible determinar la potencia efectiva disponible en el generador.

$$Pot_{generador} = Pot_{turbina} * 0,92 * 0,95$$

$$Pot_{generador} = 0,34086 Kw$$

$$Pot_{Requerida} = 0,900 Kw$$

$$Pot_{fluido\ requerido} = \frac{Pot_{requerida}}{\mu_{gen} * \mu_{turbina}}$$

$$Pot_{fluido\ requerido} = 1,1508 Kw = Q * H * \gamma$$

8. Selección de componentes y análisis de costos unitarios

8.1 Selección de compontes

En la Figura 10 se muestra la disposición final del banco de pruebas de laboratorios, con los componentes a seleccionar.

Figura 10

Renderizado final banco de laboratorio



Elaboración propia

8.1.1 Bastidor

El sistema de bastidor está conformado por tres niveles principales. Su diseño se realizó empleando tubería estructural que ofrece buena resistencia mecánica y una protección moderada frente a la corrosión. Para los paños de cada nivel se seleccionó lámina de acero hot rolled por su robustez, disponibilidad en el mercado y economía para no tener que emplear lámina de acero inoxidable.

El primer nivel se encuentra la turbina, el generador, el sistema de transmisión y el tablero eléctrico. El segundo nivel fue concebido exclusivamente para el tanque de almacenamiento de agua, mientras que el tercer nivel está diseñado para soportar la bomba. De esta manera, cada nivel cumple con una función específica que asegura el orden y la correcta distribución de cargas en la estructura y el proceso organizado de cada subsistema.

La estructura principal de los marcos de cada nivel se compone con tubería cuadrada de 2 pulgadas, mientras que los soportes internos están diseñados con tubería de 1-1/2 pulgadas del mismo calibre. Para la unión de los elementos estructurales se propone el uso de electrodo 6013, el cual puede ser aplicado con un equipo de soldadura standard.

Finalmente, para incrementar la durabilidad del bastidor se implica la aplicación de una capa de pintura hidrofóbica o anticorrosiva, que permita proteger la estructura contra la humedad y disminuir la probabilidad de corrosión. En caso de requerirse una mayor resistencia mecánica en las uniones o mayor protección en ambientes húmedos, se tuvo en cuenta, el uso de electrodo 7018 y recubrimientos epóxicos como alternativas a la seleccionada. En el Apéndice Y, se encuentran los planos de sistema.

8.1.2 Sistema hidráulico

- Tanque:

Para la selección del tanque de almacenamiento de agua se consideraron dos condiciones de trabajo principales. La primera es el espacio disponible en el segundo nivel del banco, y la segunda corresponde a la capacidad máxima de caudal entregado por la bomba. El tanque debe dimensionarse de manera que la bomba no se quede sin agua para succión.

En este caso, el volumen de almacenamiento del tanque se estableció en 80 litros, equivalente a la mitad del caudal máximo entregado por la bomba. Esta capacidad permite contar

con un margen de tiempo suficiente para apagar la bomba en caso de alguna eventualidad en el circuito hidráulico, evitando que la bomba succione en vacío. Además, si se presenta algún tipo de estancamiento en el casco de la turbina o en la conexión entre la turbina y el tanque, la bomba podrá continuar succionando caudal sin generar vacío.

Cabe destacar que dimensionar el tanque para almacenar el caudal máximo total entregado por la bomba implicaría un peso excesivo para el bastidor, lo cual no es viable desde el punto de vista estructural.

Con base en lo anterior, se presentan las dimensiones del tanque, el cual tiene un volumen ligeramente superior a 80 litros, con el fin de contar con un espacio de reserva que evite que el agua rebose.

$$\textit{Ancho} = 0,5 \textit{ m}$$

$$\textit{Alto} = 0,45 \textit{ m}$$

$$\textit{Profundo} = 0,4 \textit{ m}$$

La fabricación del tanque en acrílico transparente, se considera poco convencional y no recomendable por diversas razones. En primer lugar, la impermeabilización del sistema presenta complicaciones, ya que las uniones entre las caras del tanque requieren un pegado especial con silicona para este tipo de aplicaciones, lo cual implica costos elevados y baja practicidad.

En segundo lugar, la fragilidad del acrílico es una limitación, dado que es necesario realizar un orificio en la cara inferior para la instalación de la tubería de succión de la bomba, el accesorio de unión y sello, así como un orificio en la cara lateral derecha para la instalación de una llave de paso que facilite el vaciado del tanque para labores de mantenimiento y limpieza.

Por lo tanto, la mejor alternativa para el tanque de almacenamiento es un tanque convencional y práctico que cumpla con los requisitos de diseño y se ajuste a las necesidades previamente mencionadas.

Se seleccionó un tanque de agua portátil JINSADU, disponible en Amazon (2025), como referencia comercial para el banco de pruebas. Véase en el Apéndice D.

Al tanque seleccionado se le deben realizar algunas adecuaciones para su correcta integración al banco. Se debe realizar un orificio en la cara inferior, ubicado en el centro, para instalar la conexión de la tubería al tanque mediante una unión y un sello de PVC. El diámetro del orificio debe ser del diámetro externo de la tubería, en este caso 32mm.

Se recomienda que para realizar el orificio se utilice una herramienta afilada, como un bisturí, con el fin de obtener un corte preciso, ya que el material plástico del tanque solo permite que el orificio se realice de esta manera.

En la cara lateral derecha del tanque se observan dos orificios preexistentes, en los cuales se puede instalar la llave de paso para el vaciado del tanque.

- Tubería y accesorios de succión:

Para la tubería de succión se identificaron tres componentes fundamentales: primero, el acople entre el tanque y la tubería para la salida del agua; segundo, el acople entre la tubería y la boca de entrada de la bomba; y tercero, la canalización de PVC.

Inicialmente, para el acople entre el tanque y la tubería, se seleccionó, a partir del catálogo de PAVCO para sistemas hidráulicos, un accesorio tipo salida de tanque, también conocido como pasamuros en PVC. Este accesorio está compuesto básicamente por un cuerpo roscado, una arandela y un sello, que permiten un ajuste hermético tanto a la tubería como al tanque. La

selección del diámetro de salida fue de 1 pulgada, que corresponde al tamaño adecuado para la tubería de succión. Véase en el Apéndice E.

Para su instalación, se recomienda, en caso de ser necesario y con el fin de evitar fugas, aplicar silicona neutra y una capa de cinta de teflón en el cuerpo roscado y en la unión del accesorio.

En cuanto a la tubería de succión, se seleccionó, también del catálogo de PAVCO, una tubería de PVC de 1 pulgada, la cual cumple con las condiciones de presión establecidas en los cálculos hidráulicos. Esta selección se realizó considerando además la disponibilidad del material en el mercado. Véase en el Apéndice F.

La unión universal de PAVCO es el acople que conecta la tubería de succión con la bomba, ajustándose directamente a la tubería. Se recomienda asegurar un buen apriete tanto en la boca de succión como en la tubería, y aplicar silicona entre la unión del tubo y la unión universal para garantizar un sellado hermético y evitar fugas. Véase en el Apéndice G.

- Bomba:

Para la selección de la bomba se consideró el caudal máximo necesario para alcanzar unas revoluciones por minuto (RPM) que permitieran el correcto funcionamiento del alternador. Se determinó que el caudal requerido debía estar en el rango de 120 a 160 L/min. Por seguridad, se seleccionó una bomba que operara en el límite superior de este rango.

Adicionalmente, se optó por una bomba que funcione a 110 V monofásica, dado que, según la disposición del laboratorio, la forma más accesible de energía es a través de los tomacorrientes disponibles en el mismo.

Finalmente, se tuvieron en cuenta las dimensiones de la bomba, asegurando que fueran adecuadas para su instalación en el tercer nivel del banco sin inconvenientes, así como que los

diámetros de succión y descarga fueran de 1 pulgada, conforme a los requerimientos y a la selección de la tubería de PVC.

La bomba seleccionada corresponde al modelo CPM 650M, monofásica 110 V, con potencia de 1.5 HP, de 18m de altura máxima entregada según el catálogo técnico del fabricante(Pedrollo, 2023). Véase en el Apéndice H.

Para la instalación de la bomba se requieren cuatro pernos de cabeza hexagonal. De acuerdo con el diámetro de las perforaciones en la base de la bomba, se seleccionaron pernos hexagonales tipo ISO 4014, M8, conforme a la norma ISO 4014(International Organization for Standardization, 2011).

Además, es necesario utilizar una arandela plana y una tuerca para cada perno, garantizando un montaje seguro y firme.

Adicionalmente, se debe realizar una perforación en la lámina del bastidor utilizando un taladro con broca adecuada para el diámetro de los pernos seleccionados.

- Tubería y accesorios de descarga:

Para la tubería de descarga, los componentes a seleccionar son dos codos de 90°, un acople en la salida de la boca de la bomba y los tramos de tubería correspondientes. Para la salida de la boca de la bomba se requiere un acople universal, igual al utilizado en la entrada, como se muestra en el apéndice G.

De igual manera, el tipo de tubería para la descarga es el mismo que el de la tubería de succión, mostrado en el apéndice F. Las dimensiones de los tramos de tubería se especifican en el diagrama hidráulico del sistema.

En cuanto a los codos, según el diseño hidráulico se requieren dos codos de 90°. Debido a la selección de la tubería del sistema, estos codos son de PVC con un diámetro de 1". Los codos

seleccionados se encuentran en el catálogo de PAVCO para tubería PVC de presión para agua fría. Véase en el Apéndice I.

En la tubería de descarga se requiere una válvula reguladora con el fin de controlar la cantidad de caudal que llega a la turbina, permitiendo así la realización de las diferentes prácticas de laboratorio propuestas.

La válvula seleccionada para el sistema es una válvula de bola para agua con manija tipo mariposa, modelo Enolgas. Esta válvula ha sido elegida por su capacidad de cierre rápido (90°), facilidad de operación manual, compatibilidad con la tubería de PVC presión agua fría de 1" y resistencia adecuada para aplicaciones hidráulicas de laboratorio. Además, su construcción garantiza un sellado efectivo, minimizando fugas y asegurando un control de flujo fiable. Como se evidencia en el Apéndice J.

La válvula cuenta con rosca NPT, lo que permite su conexión directa a la tubería. Se recomienda aplicar silicona neutra y una capa de cinta de teflón para asegurar un sellado adecuado y evitar fugas. De igual manera, los codos se unen a la tubería mediante rosca y pegamento para PVC, garantizando una unión segura y hermética.

- Indicadores de presión y de caudal:

Para el funcionamiento del sistema y considerando la disposición prevista para el banco de pruebas y las prácticas de laboratorio que se desean realizar, se requieren dos indicadores de presión ubicados según se muestra en el diagrama hidráulico.

Los indicadores de presión fueron seleccionados en función de la presión máxima entregada por la bomba, que corresponde a la presión máxima a la que puede llegar el equipo y la presión máxima a la que puede llegar el sistema. Esta presión máxima es de 10 bares, equivalentes a 145.038 psi. Sin embargo, para prevenir daños en caso de una posible sobrepresión en el sistema,

se recomienda seleccionar indicadores con un rango de medición ligeramente superior a esta presión máxima.

Para la instrumentación del sistema se seleccionó el indicador de presión ABZMM100-10 BAR/PSI-U/B-G de Bosch Rexroth con relleno de glicerina, de acuerdo con el catálogo técnico RS 50205/2007-01. Este dispositivo cuenta con un diámetro nominal de 100 mm, conexión inferior y una escala doble en bar/psi con rango de 0–10 bar (0–145 psi), lo que permite una lectura clara y precisa dentro de las condiciones de operación del banco de pruebas hidráulico. Véase en el Apéndice K.

Debido al tipo de indicador de presión seleccionado, es necesario utilizar accesorios tipo tee. En este caso, se requiere una tee reducida, ya que la rosca del indicador es de 1/2 pulgada. Por lo tanto, se seleccionó del catálogo PAVCO una tee con dimensiones 1" x 1/2". (Apéndice L)

Para el indicador de caudal se decidió utilizar un indicador de caudal electrónico que permita obtener mediciones precisas, además de ser un equipo disponible en el mercado y con un precio accesible. Por estas razones, se eligió el indicador de caudal PIUSI K24.

Este equipo cuenta con un cuerpo de aluminio y una tarjeta electrónica con pantalla LCD. Además, se ajusta a las condiciones de operación en cuanto a caudal y presión, puede ser calibrado y funciona con dos baterías AAA. (Apéndice M)

8.1.3 Sistema de transmisión

- Poleas:

Teniendo en cuenta que la potencia de la bomba no es elevada, la transmisión no estará sometida a cargas altas ni a vibraciones extremas, y se trabaja con tubería y componentes relativamente livianos, se requiere un sistema fiable, compacto y económico.

En este contexto, el sistema de correas SPA con polea taper representa una excelente opción. Este diseño permite repartir la carga entre varias correas, reducir el desgaste, evitar el deslizamiento y mantener una tensión razonable, sin necesidad de poleas de gran tamaño. Se seleccionó una polea trapezoidal SPA de 2 ranuras, tipo 4, con buje taper, modelo 2 SPA 180 con diámetro primitivo de 180 mm que coincide con los resultados de los cálculos del sistema de transmisión, conforme al catálogo de Disumtec. Véase en el Apéndice N.

Además, aunque el alternador ya incluye una polea integrada, en caso de que se requiriera una selección adicional, se consideraría la polea de 2 ranuras SPA 120.

- Correas:

De acuerdo con el cálculo teórico realizado, la longitud primitiva de la correa resultó aproximadamente 1074 mm. Con base en el *Manual técnico para correas trapezoidales* (Optibelt, 2021), en el cual se presentan las longitudes normalizadas para el perfil SPA, la opción comercial más cercana corresponde a la correa SPA 1082 mm.

La elección de una longitud comercial ligeramente superior a la calculada resulta conveniente, ya que permite ajustar la distancia entre centros mediante el sistema tensor previsto en el banco de pruebas. Esto asegura una instalación adecuada, un tensado correcto y una mayor vida útil de la transmisión. Por lo tanto, se seleccionaron dos correas Optibelt SPA 1082 mm, compatibles con la polea trapezoidal de 2 ranuras SPA con buje taper previamente definida.

8.1.4 Sistema eléctrico:

- Cable conductor:

Para la selección del conductor principal del sistema, se debe considerar el amperaje máximo nominal de 15 A, lo que determina el calibre del conductor en 14 AWG de cobre para 110V (CIDET, 2021), según los cálculos realizados. Este calibre se selecciona con una protección

de 90°, adecuada para las condiciones del sistema. Para la protección del conductor, resulta suficiente un dispositivo de 15 A, ya que la corriente máxima que circula por él durante el funcionamiento es de 10,1 A, lo que asegura un margen de seguridad sin riesgo de sobrecarga. De la misma manera y a partir de los cálculos, para la tensión a DC se buscó un cable vehículo #18AWG(S.A.S., n.d.-b).

- Tablero eléctrico:

En cuanto al tablero eléctrico seleccionado, se han realizado los cálculos necesarios para su dimensionamiento, considerando las dimensiones obtenidas en función de los diferentes equipos que se instalarán en él. Además, se ha definido la distribución adecuada para optimizar la disposición interna del tablero, asegurando accesibilidad, seguridad y cumplimiento normativo. Este tablero según las dimensiones se puede mandar a hacer en el momento en el que se requiera.

- Bloques de distribución:

Para la selección del bloque de distribución, se busca garantizar un suministro de energía eficiente y equilibrado a los diferentes dispositivos conectados al sistema. En el contexto de la aplicación para el banco de laboratorio, se ha seleccionado un bloque de distribución con 3 barras, que permite una distribución adecuada de las cargas. También se necesita de un bloque de distribución con 2 barras.

Adicionalmente, se requiere la instalación de dos bloques de distribución: uno en cada nivel del sistema, donde el de tres barras opera a 110 V y el de dos barras opera a 12 V. Los bloques seleccionados son de la marca Onka con 7 derivaciones cada uno y una corriente nominal de 80A que cumple con los requerimientos del sistema. La referencia del de dos barrajes es la 2081,

mientras que la de tres barrajes es 2171 (Electric, n.d.). En el Apéndice O se muestran los bloques seleccionados.

- Fuente:

En el banco de laboratorio, la fuente de alimentación recibe la electricidad generada por el alternador a 110 V en corriente alterna y la convierte en 12 V de corriente continua. Esta transformación permite evidenciar la generación y utilización de energía en aplicaciones diarias.

Entre los ejemplos de aplicaciones se incluyen pilotos LED, tomacorrientes para dispositivos como celulares y computadores, así como otras cargas domésticas en general, ya que la mayoría de los aparatos electrónicos funcionan con 12V de corriente continua. La fuente seleccionada es de la marca CZELE MDR-6012 para proporcionar 12V DC con una eficiencia de hasta el 85% y un rendimiento confiable(CZELE, n.d.). En el Apéndice P se evidencia la fuente seleccionada.

- Multímetro digital:

Para verificar los distintos parámetros del sistema eléctrico, se requiere un instrumento de medición adecuado. Con fines académicos, es esencial contar con la medición precisa del voltaje y la corriente generados y suministrados al sistema, lo que permite monitorear el rendimiento y la eficiencia operativa en tiempo real. El multímetro seleccionado es de la marca ALAMSCN y se encuentra en el Apéndice Q.

- Protección eléctrica:

Este elemento protege el circuito contra sobrecargas. Su selección debe considerar que el sistema eléctrico es de una sola fase, con la protección dimensionada según la corriente que soporta el cable (en este caso, 15 A), y diseñada para operar en una red de 110 V de corriente alterna. La

protección seleccionada es monofásica que opera en una red de hasta 230V, lo cual admite la red con la que se va a trabajar en el banco es un breaker monopolar ABB 1×16 A, capacidad de ruptura 6 kA. Se puede visualizar en el Apéndice R.

- Accesorios del tablero:

Los accesorios presentes en el tablero permiten al estudiante verificar que el sistema está funcionando de manera correcta. Para este fin, se incorporan un piloto luminoso verde a 110 V y un piloto luminoso rojo a 12 V. Estos indicadores luminosos operan directamente con las corrientes respectivas, y su encendido confirma la entrega adecuada de energía al sistema. Los pilotos luminosos seleccionados son de la marca Autonics, por su disponibilidad en el mercado y el costo de estos.

De manera similar, se requieren dos tomacorrientes a 110 V de la marca Leviton, diseñados para conectar equipos que operen con este voltaje. Se ha dimensionado la capacidad energética suficiente para evidenciar el suministro de energía al conectar dispositivos como computadores o celulares, simulando aplicaciones reales. Continuando con los elementos de demostración, se propone una bombilla Sylvania que se encienda a 110 V, permitiendo una visualización clara del funcionamiento del sistema.

Adicionalmente, el tablero debe incorporar una canaleta ranurada para organizar y guiar los cables de manera ordenada, lo que facilita el acceso y el mantenimiento del sistema. Asimismo, se emplea un riel para montar los accesorios que requieren fijación permanente al tablero. En el Apéndice S se encuentran los accesorios del tablero.

8.2 Análisis presupuestal del sistema

Para analizar la viabilidad del sistema, se realiza un análisis presupuestal que organiza y estima los costos de todos los elementos necesarios para su ejecución. Este análisis incluye la lista

de materiales y equipos, así como la mano de obra, imprevistos, transporte e impuestos asociados a las compras.

A partir de este listado, se cuantifican las cantidades requeridas de cada elemento, ya sea en unidades o en metros según corresponda. De igual manera, se estiman las horas de trabajo de mano de obra para la construcción de cada subsistema y el ensamblaje final. En el análisis presupuestal se utilizó un método de codificación para clasificar los subsistemas, los materiales y la mano de obra del proyecto.

Con las cantidades definidas, se cotizan los precios de los materiales consultando catálogos, proveedores y distribuidores, mientras que las horas de mano de obra se calculan en función del salario mínimo vigente para 2025. Posteriormente, se determinan los costos parciales (exclusivamente de materiales), el costo total directo (que incorpora la mano de obra) y, finalmente, los costos indirectos y adicionales (transporte e imprevistos, calculados al 3 %). Estos cálculos se efectúan por subsistema para obtener, al final, el costo total del proyecto.

La tabla del análisis presupuestal se presenta en el Apéndice T, donde el costo final del proyecto asciende a 10.986.606 millones de pesos colombianos. Este monto resulta favorable al considerar los beneficios educativos y formativos que generará para los estudiantes y la comunidad universitaria.

9. Elaboración de plan de mantenimiento AMEF y guías de laboratorio

9.1 Plan de mantenimiento AMEF

Para el correcto funcionamiento, después de la puesta en marcha del banco de laboratorio, es necesario implementar un plan de mantenimiento. En este caso, se utilizó el tipo AMEF (Análisis del Modo y Efecto de Fallas). Este análisis permite identificar y priorizar los modos de

falla y sus efectos en equipos o procesos, sirviendo como base para diseñar estrategias preventivas eficaces que mejoran la confiabilidad y reducen costos (Carlson, 2012).

El plan de mantenimiento está organizado en secciones claramente definidas. En primer lugar, se presenta el sistema junto con una descripción detallada de su función, lo cual permite comprender el propósito y alcance de cada componente dentro del banco de laboratorio.

Para nuestro banco de pruebas, el plan de mantenimiento se divide en cuatro secciones que abarcan la totalidad del sistema. A continuación, se describen los cuatro sistemas principales y sus respectivas funciones:

- Sistema hidráulico: Su función es almacenar, conducir y regular el flujo de agua, garantizando el caudal y la presión necesarios para la operación de la turbina.
- Sistema eléctrico y de generación: Su función es recibir la energía eléctrica generada en el alternador y suministrarla en el tablero eléctrico.
- Sistema de transmisión: Su función es transferir y adaptar la potencia mecánica de la turbina al alternador, garantizando que éste gire a la velocidad adecuada para la generación eléctrica.
- Turbina Michell-Banki: Su función es recibir el caudal de agua y transformarlo en energía mecánica de rotación.

Posteriormente, se analiza la falla funcional, que consiste en identificar y describir las diferentes fallas por las cuales cada sistema podría dejar de cumplir con su función asignada. Este análisis tiene como objetivo principal prevenir la ocurrencia de dichas fallas mediante la implementación de acciones correctivas y preventivas adecuadas.

Una vez identificadas las fallas funcionales, estas se desglosan en diferentes modos de falla, donde se interpretan las diversas causas que pueden originarlas, como defectos de diseño, errores

humanos (falta de experiencia, operación incorrecta), desgaste de componentes, falta de lubricación o problemas de montaje. Estos modos de falla son identificados y analizados, con el fin de prevenir o mitigar sus efectos antes de que ocurran.

Mediante la aplicación del método de los porqués, se busca identificar la causa raíz de cada modo de falla, es decir, la razón por la cual ocurren los problemas. Este método consiste en formular la pregunta "¿por qué?" de manera reiterada hasta llegar al origen del problema, lo que permite implementar soluciones efectivas y duraderas.

Una vez desarrollados los pasos anteriores, se determinan los efectos iniciales, es decir, las consecuencias inmediatas que se producen cuando cada sistema falla. Para así, evaluar el impacto de las fallas y priorizar las acciones de mantenimiento.

De la misma manera, se prevén los efectos finales, es decir, las consecuencias que afectan a la totalidad del banco de pruebas en caso de que alguno de los modos de falla ocurra.

En cuanto a las tareas de mantenimiento, se clasifica el tipo de consecuencia en cinco categorías según la norma SAE JA1011 (SAE International, 1999):

- Oculta: No es evidente ni perceptible para el personal de mantenimiento ni para el equipo.
- Seguridad: Implica riesgos para la seguridad o la salud de las personas, ya sean los operarios, el consumidor final del bien o el servicio.
- Ambiental: Este tipo de falla genera un impacto negativo en el medio ambiente, pudiendo manifestarse mediante derrames, fugas u otros daños ambientales.
- Operacional: Afecta la capacidad de la planta para continuar con la producción, comprometiendo la eficiencia y continuidad del proceso.

- No operacional: No afectan la operabilidad de la planta, pero pueden generar gastos adicionales u otros efectos negativos indirectos.

Asimismo, se define si la tarea de mantenimiento es de tipo preventiva o predictiva. El mantenimiento preventivo tiene como objetivo minimizar las acciones correctivas mediante la ejecución de tareas rutinarias de control y el reemplazo periódico de componentes desgastados o deteriorados(Guzmán Y Valle et al., n.d.). Por otro lado, el mantenimiento predictivo, aunque comparte el propósito de anticiparse a las fallas, se basa en el monitoreo constante de los equipos mediante herramientas que permiten detectar el estado de los componentes en intervalos de tiempo específicos, facilitando la toma de decisiones basadas en condiciones reales(Guzmán Y Valle et al., n.d.).

Lo anterior tiene como finalidad presentar las tareas de mantenimiento que deben realizarse, especificando la frecuencia con la que se deben ejecutar, el responsable o ejecutor, la cantidad de personal requerido, la duración estimada de la ejecución y si dichas tareas deben llevarse a cabo con el equipo en operación o fuera de servicio.

En el Apéndice U se presenta el formato tipo tabla del mantenimiento AMEF realizado para el banco de laboratorio, elaborado conforme a lo descrito anteriormente respecto a la metodología y estructura de ejecución.

9.2 Guías de laboratorio

Con el fin de maximizar el aprovechamiento y funcionamiento del banco una vez construido, se propusieron tres guías de laboratorio diferentes, diseñadas para asegurar un uso adecuado y prolongar su vida útil.

Considerando que actualmente la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS no cuenta con un banco de laboratorio que permita la práctica de generación de energía (Apéndice V), se

desarrolló una guía específica que permite al estudiante evidenciar de forma experimental el análisis de la conversión de energía eléctrica a partir del funcionamiento de una turbina Michell-Banki acoplada a un generador.

De igual manera, dado que en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS no existe un banco funcional que permita demostrar experimentalmente las pérdidas en tuberías y accesorios (Apéndice W), otra de las guías está orientada al estudio experimental y la comparación con cálculos teóricos. Esta guía permite determinar experimentalmente las pérdidas de energía por fricción y accesorios en un sistema de bombeo, y compararlas con los valores teóricos calculados.

Por otro lado, aunque ya existe un laboratorio que permite evidenciar de manera experimental el comportamiento de una turbina hidráulica, esta nueva experiencia posibilita evaluar el desempeño de una turbina tipo Michell-Banki, determinando variables como potencia de salida, eficiencia y características de operación (Apéndice X). Esto complementa la práctica actualmente utilizada en el laboratorio, ya que permite realizar una comparación entre el funcionamiento de esta turbina y la Michell-Banki, evidenciando los diferentes usos y aplicaciones de ambas.

Las guías fueron elaboradas y organizadas de manera que resulten fáciles de comprender para el estudiante, por lo que se dividieron en diferentes secciones.

En primer lugar, se presenta el objetivo de cada práctica de laboratorio, que orienta el desarrollo de cada guía. A continuación, se detallan los materiales y equipos necesarios para la realización de las prácticas, acompañados de un diagrama que muestra la disposición del banco de laboratorio.

Asimismo, se incluyen los fundamentos teóricos con sus respectivas fórmulas, necesarios para el desarrollo de las guías y el análisis de datos. Se describe un procedimiento paso a paso, diseñado para facilitar la obtención de los datos requeridos y la comprensión de la práctica.

Para los datos obtenidos durante la ejecución, se proporciona una tabla que permite organizarlos de manera clara y eficiente para el estudiante. En cuanto al análisis de datos, se explica qué cálculos deben realizarse y qué comparaciones, así como las gráficas que deben elaborarse para visualizar el comportamiento de las variables analizadas a lo largo de la práctica.

Finalmente, se incluye una lista de variables y unidades, donde se presentan cada una de las variables de las ecuaciones presentadas con su respectivo símbolo.

10. Conclusiones

- Se diseñó un banco de laboratorio para la generación de energía eléctrica mediante una turbina Michell-Banki, adaptada de un proyecto de grado previo. El banco está concebido para operar con un caudal máximo de 160 L/min, lo que produciría 290,48 rpm en la turbina. Mediante un sistema de transmisión diseñado se regula la potencia entregada al alternador, asegurando un funcionamiento eficiente y estable. Asimismo, se planteó un tablero eléctrico interactivo como elemento de validación práctica, destinado a la conexión de cargas representativas tales como luces LED, cargadores de celulares y computadores portátiles.

Este trabajo constituye la base conceptual y técnica para que en un futuro se materialice la construcción y validación experimental del banco de laboratorio, lo que permitirá contrastar los resultados teóricos con el desempeño real del sistema.

- De acuerdo con los cálculos realizados, la potencia disponible en el sistema es suficiente para cubrir parte del consumo eléctrico, aunque es ligeramente menor a la planteada en el cuadro de cargas. El valor del cuadro de cargas se encuentra sobredimensionado para un sistema real de este tipo; por esto mismo, el sistema se considera favorable para su aplicación final.

La potencia obtenida de 340.86 Wh diario indica que, con una buena distribución y priorización de cargas, es posible alimentar el sistema eléctrico e incluso sumar algunos equipos adicionales del laboratorio sin cambiar la turbina. Si en el futuro se requiere más capacidad, la mejor opción sería usar una bomba con mayor caudal

o altura, lo que aumentaría la potencia disponible sin hacer modificaciones importantes en la turbina.

- Se seleccionaron los elementos que integran el banco de pruebas, entre ellos el sistema de transmisión, el alternador y el tablero eléctrico, verificando la compatibilidad entre los distintos componentes. La elección se realizó considerando su disponibilidad en el mercado y criterios de costo, lo que permitió consolidar un diseño viable tanto desde el punto de vista tanto técnico como económico. Según la proyección realizada, el costo total del proyecto asciende a 10.986.606 millones de pesos, incluyendo no solo los equipos seleccionados, sino también gastos asociados a mano de obra, transporte e imprevistos que inciden en el valor final.
- Se elaboraron guías de laboratorio orientadas al uso y comprensión del banco de pruebas, en las que se describen los procedimientos operativos, las recomendaciones de seguridad y los fundamentos teóricos que deben considerarse durante las prácticas propuestas, además de un formato para la organización de los datos recolectados. Del análisis de las tres guías de laboratorio se concluye que la válvula reguladora de caudal constituye el elemento fundamental, dado que en todos los casos la variable de ajuste corresponde a su porcentaje de apertura, lo que la posiciona como un componente crítico en la operación y el mantenimiento del sistema. De manera complementaria, se formuló un plan de mantenimiento AMEF, que permite anticipar posibles fallas, definir acciones preventivas y asegurar la disponibilidad del sistema una vez construido.

- En términos generales, el banco cuenta con un diseño seguro y confiable que facilita su correcta operabilidad incluso para usuarios con poca experiencia, como los estudiantes, siempre y cuando se apliquen las medidas de seguridad básicas requeridas para este tipo de equipos. En cuanto a la parte eléctrica, el banco trabaja con un nivel de tensión relativamente bajo de 110 V; sin embargo, no se recomienda la manipulación interna del tablero de forma continua. Finalmente, en caso de que a futuro se desee repotenciar el banco, la compatibilidad y el sobredimensionamiento de los subsistemas brindan la posibilidad de adecuar el sistema para llegar a energizar la totalidad del laboratorio a partir del mismo.

Referencias Bibliográficas

- Alte, M. (2023). *Eogen: Electronic Generator Controller*.
<https://www.meccalte.com/downloads/eogen.pdf>
- Amazon.com. (n.d.). *Voltímetro - Amperímetro - Frecuencia Indicador de Corriente [Producto multifunción]*. <https://www.amazon.com/-/es/Voltímetro-Amperímetro-Frecuencia-Indicador-Corriente/dp/B0CB45MYCJ>
- Autonics. (n.d.). *L2RR-L3GL – Lámpara piloto verde (LED), Ø22/25 mm, cabeza plana, 110-220 VAC*. <https://www.autonics.com/es/model/L2RR-L3GL>
- Bosch Rexroth AG. (2007). *Catálogo de manómetros: RS 50205/2007-01*.
- Calculator, O. (2025). *Calculadora de longitud de correa*.
<https://www.omnicalculator.com/es/fisica/calculadora-de-longitud-de-correa>
- Capital, E. (n.d.). *Piloto LED 22 mm rojo, 12-24 VAC/DC – Autonics*.
<https://electrificadoracapital.com/producto/piloto-led-22mm-rojo-12-24vac-dc-autonics>
- Carlson, C. S. (2012). *Effective FMEAs: Achieving Safe, Reliable, and Economical Products and Processes using Failure Mode and Effects Analysis*. Wiley.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de Fluidos*.
- CIDET. (2021). *Certificado de conformidad de producto No. 02363: Cables multiconductores de cobre suave flexibles tipo dúplex CPE-SPT y tipo termoflex con aislamiento PVC--Nylon para 90 °C y chaqueta en PVC para 600 V*.
<http://www.cidet.org.co/consulta-certificados>

CZELE. (n.d.). *MDR-60 Spec – Especificaciones técnicas del regulador MDR-60.*

<https://drive.google.com/file/d/1trsQWDuCDXEEIVco36kjTSFhmtLZGA2Y/view>

Disumtec. (n.d.). *Polea trapezoidal 2 ranura taper SPA.*

Electric, O. (n.d.). *Bloques de distribución -- Catálogo técnico.*

Enolgas Bonomi S.p.A. (2023). *EKO BASIC – Full Bore Ball Valves for Water (Ficha técnica).*

Flow of fluids through valves, pipes, pumps and fittings. (2018). Crane Co.

Guzmán Y Valle, E., Máter, A., Magisterio, D., Facultad, N., Tecnología, D. E., & Porras, E.

T. (n.d.). *Tipos de mantenimiento industrial.*

International Organization for Standardization. (2011). *ISO 4014: Hexagon head bolts — Product grades A and B.* ISO.

JINSADU. (2025). *Tanque de agua portátil: Tanque de almacenamiento de agua para acampar con manguera de espiga, contenedor de agua de plástico, contenedor de almacenamiento de agua para almacenamiento de agua.*

<https://www.amazon.com/dp/B0DD4KJM5G>

Ministerio de Minas y Energía. (2013). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).* Ministerio de Minas y Energía de Colombia.

Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas* (4th ed.). Pearson Educación.

Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., & Huebsch, W. W. (2013). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (7th ed.). Wiley.

National Fire Protection Association. (2023). *NFPA 70: National Electrical Code (NEC)* (2023rd ed.). NFPA.

- OLADE. (1983). *Manual de diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas. Volumen I: Turbinas Michell-Banki.*
- Optibelt. (2021). *Manual técnico para correas trapeciales.*
<https://suministrosrsercoin.com/wp-content/uploads/2021/05/catalogo-correas-transmision-optibelt.pdf>
- Organización Latinoamericana de Energía. (n.d.). *DISEÑO, ESTANDARIZACION Y FABRICACION DE TURBINAS.*
- PAVCO Wavin. (2023). *Manual Técnico de Tubería Presión PVC – Predial.*
- Pedrollo. (2023). *Catálogo técnico de bombas: Serie CP/CPM.*
- Perez-Rodriguez, A. J., Sierra-Del Rio, J., Grisales-Noreña, L. F., & Galvis, S. (2021). Optimization of the efficiency of a michell–banki turbine through the variation of its geometrical parameters using a pso algorithm. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, 16, 37–46. <https://doi.org/10.37394/232011.2021.16.5>
- Romero, F., Velásquez, L., & Chica, E. (2020a). Consideraciones de diseño de una turbina Michell-Banki. *Revista UIS Ingenierías*, 20(1), 23–46.
<https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021003>
- Romero, F., Velásquez, L., & Chica, E. (2020b). Consideraciones de diseño de una turbina Michell-Banki. *Revista UIS Ingenierías*, 20(1), 23–46.
<https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021003>
- SAE International. (1999). *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes* (Issue JA1011).

S.A.S., I. E. (n.d.-a). *Breaker de riel ABB monopolar 1 × 16\A, 6\kA [Producto en línea].*

<https://interelectricas.com.co/breakers/1249-breaker-de-riel-abb-monopolar-1-x-16a-6-ka.html>

S.A.S., I. E. (n.d.-b). *Cable de cobre encauchetado 2 × 18 AWG (Producto en línea).*

<https://interelectricas.com.co/alambres-y-cables/2838-cable-de-cobre-encauchetado-2-x-18-awg-metro.html>

S.A.S., I. E. (n.d.-c). *Toma doble Leviton 15 AMP 125 V, polo a tierra.*

<https://interelectricas.com.co/articulos-electricos/92-toma-leviton-doble-15amp-con-polo-blanca.html>

S.p.A., P. (2023). *PIUSI K24 - Digital turbine flow meter for low viscosity fluids (datasheet).*

<https://www.piusi.com/eng/products/k24-digital-flow-meter>

Sylvania. (2024). *LED Toledo A60 10W WW DIM: Ficha técnica.*

UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGETICA (UPME), PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA (PUJ), DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE CIENCIA, T. E. I. (CONCIENCIAS), INSTITUTO DE HIDROLOGIA, M. Y. E. A. (IDEAM), & INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI (IGAC). (2015). *ATLAS POTENCIAL HIDROENERGÉTICO DE COLOMBIA.*

White, F. M. ., & Klein, S. A. . (2011). *Fluid mechanics* (7th edition). McGraw Hill.

Apéndices

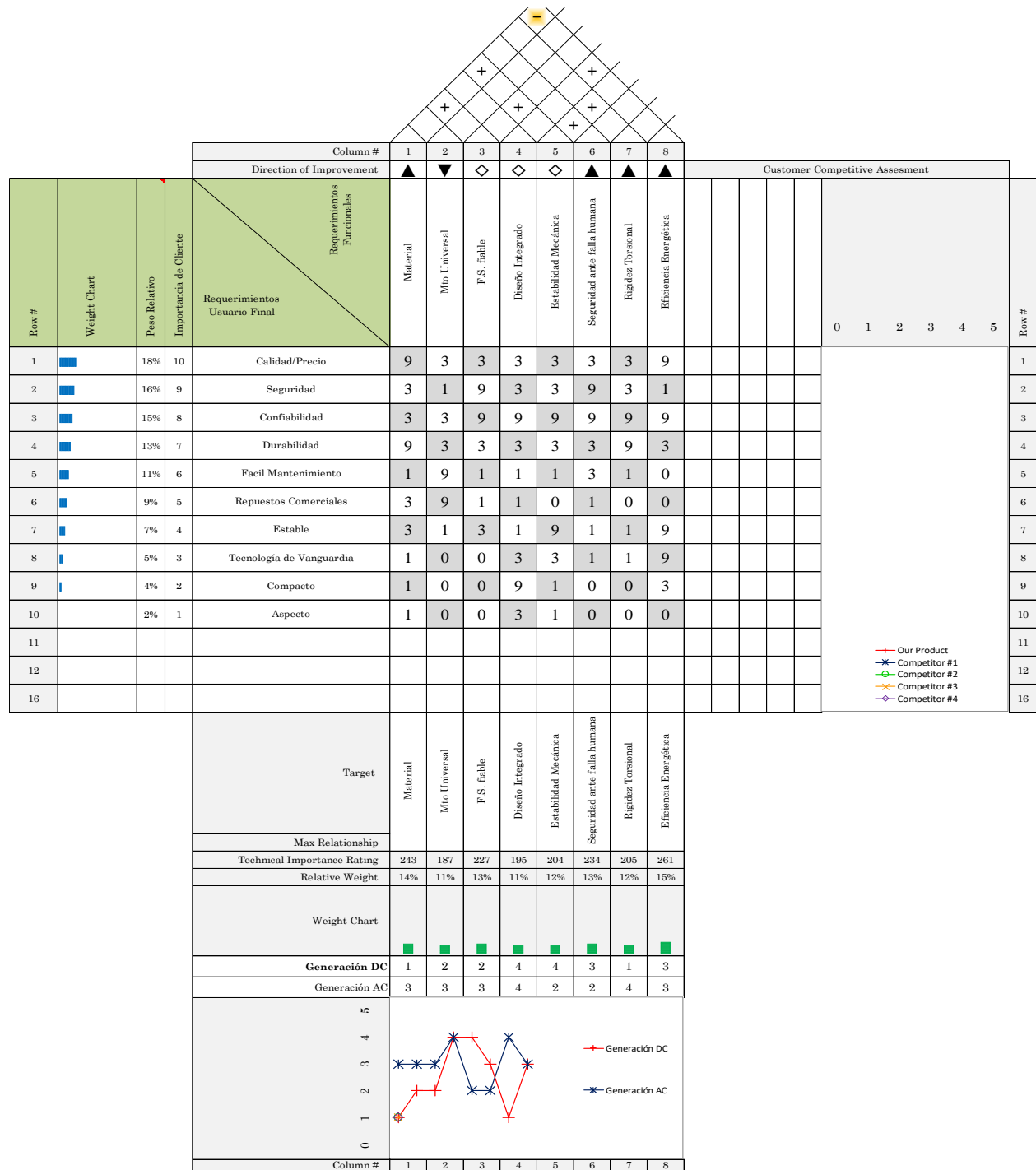
Apéndice A. Tabla de consumos del banco de pruebas

Tabla de Consumos Banco de Pruebas

Equipos Eléctricos y Electrónicos						
Item	Descripción	Cantidad	Consumo en vatios [W]	Consumo de vatios total [W]	Horas de uso al día	Consumo de energía hora [Wh]
1	Piloto Luminoso verde 110V	1	1,1	1,1	2	2,2
2	Piloto Luminoso rojo 12V	1	0,3	0,3	2	0,6
3	Fuente de 110VAC-12VDC	1	10	10	2	20
4	Cargador de computador	1	120	120	2	240
5	Lampara/Bombill a 110V	2	10	20	2	40
6	Cargador de Teléfono Carga rápida	5	20	100	2	200
7	Panel multímetro digital	1	15	15	2	30
Consumo total día				532,8		[Wh/día]

Elaboración propia

Apéndice B. Matriz QFD



Elaboración propia

Apéndice C. Listado de materiales internos del tablero**Listado de Materiales Internos Tablero**

Equipos Eléctricos y Electrónicos			
Item	Descripción	UND	Cantidad
1	Piloto Luminoso verde 110V	UND	1
2	Piloto Luminoso rojo 12V	UND	1
3	Fuente de 110VAC-12VDC	UND	1
4	Tomacorriente 110V	UND	2
5	Bloque de Distribución de 2 barras	UND	1
6	Protección Monofásica de 15A / 110V	UND	1
7	Panel multímetro digital	UND	1
8	Canaleta Ranurada	m	2
9	Riel DIN OMEGA	m	0,5
10	Bloque de Distribución de 3 barras	m	1
11	Cable Vehículo #18AWG para tensión DC	m	6
12	Cable de cobre #14AWG para 110V	m	3

Elaboración propia

Apéndice D. Tanque seleccionado para el banco de pruebas



Tomado de contenedor de agua de plástico (JINSADU, 2025)Amazon.

<https://www.amazon.com/dp/B0DD4KJM5G>

Apéndice E. Accesorio tipo salida de tanque



Tomado de Manual técnico de tubería presión PVC (PAVCO Wavin, 2023)

Apéndice F. Tubería seleccionada PVC 1”



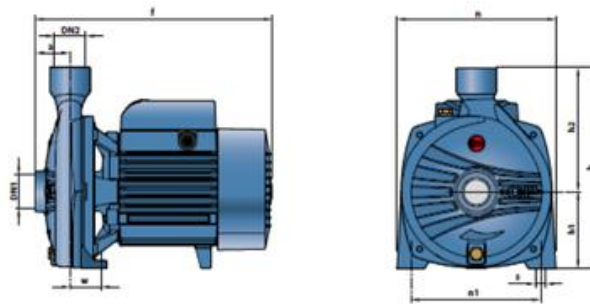
Tomado de Manual técnico de tubería presión PVC (PAVCO Wavin, 2023)

Apéndice G. Unión universal



Tomado de Manual técnico de tubería presión PVC (PAVCO Wavin, 2023)

Apéndice H. Dimensiones de la bomba CPM 650M, monofásica 110V



MODELO	BOCAS		DIMENSIONES mm										kg	
	DN1	DN2	a	f	h	h1	h2	n	n1	w	s	1~	2~	
Monofásica	Trifásica		42	253	205	82	123	165	135	41	10	6.9	7.1	
CPm 600	CP 600	1"										1"	8.3	8.0
CPm 610	CP 610												11.5	10.5
CPm 620	CP 620	51	367	260	110	150	206	165	44.5	11	17.8	17.2		
CPm 650-650M	CP 650-650M										18.9	17.9		
CPm 660-660M	CP 660-660M										20.7	20.1		
CPm 670-670M	CP 670-670M													

Tomado de Catálogo técnico de bombas: Serie CP/CPM (Pedrollo, 2023).

Apéndice I. Codos 90°



Tomado de Manual técnico de tubería presión PVC (PAVCO Wavin, 2023)

Apéndice J. Válvula de globo Enolgas



Tomado de EKO BASIC – Full Bore Ball Valves for Water (Ficha técnica)(Enolgas Bonomi S.p.A., 2023)

Apéndice K. Indicador de presión ABZMM100-10 BAR/PSI-U/B-G de Bosch Rexroth



Tomado de Catálogo de manómetros: RS 50205/2007-01(Bosch Rexroth AG, 2007)

Apéndice L. Accesorio tipo tee PVC 1" X 1/2"



Tomado de Manual técnico de tubería presión PVC (PAVCO Wavin, 2023)

Apéndice M. Indicador de caudal digital PIUSI K24



Tomado de PIUSI K24 – Datasheet técnico(PIUSI., 2023)

Apéndice N. Polea trapezoidal de 2 ranuras tipo SPA



Tomado de (Disumtec, n.d.) , “Polea trapezoidal 2 ranura taper SPA”,
<https://www.disumtec.com/es/correas-y-poleas/3800000409-polea-trapezoidal-2-ranura-taper-spa.html>

Apéndice O. Bloques de distribución Onka



Tomado de Onka Electric (Electric, n.d.), Catálogo técnico de bloques de distribución.



Tomado de Onka Electric (Electric, n.d.), Catálogo técnico de bloques de distribución.

Apéndice P. Fuente 12V CZELE MDR-6012



Tomado de MDR-60 Spec (CZELE, n.d.). *Recuperado de Google Drive:*
<https://drive.google.com/file/d/1trsQWDuCDXEEIVco36kjTSFhmtLZGA2Y/view>

Apéndice Q. Multímetro digital



Medidor digital multifunción (voltímetro, amperímetro y frecuencia).
Tomado de Amazon.com (Amazon.com, n.d.), “Voltímetro-Amperímetro-Frecuencia Indicador de Corriente”. Recuperado de <https://www.amazon.com/-/es/Volt%C3%ADmetro-Amper%C3%ADmetro-Frecuencia-Indicador-Corriente/dp/B0CB45MYCJ>

Apéndice R. Breaker monopolar ABB 1×16 A, capacidad de ruptura 6 kA.



Tomado de ABB. (S.A.S., n.d.-a), *Breaker de riel ABB monopolar 1 × 16 A 6 kA* [Producto en línea]. Recuperado de <https://interelectricas.com.co/breakers/1249-breaker-de-riel-abb-monopolar-1-x-16a-6-ka.html>

Apéndice S. Accesorios del tablero



Tomado de Piloto LED 22 mm rojo 12-24 VAC/DC (*Capital, n.d.*). Recuperado de <https://electrificadoracapital.com/producto/piloto-led-22mm-rojo-12-24vac-dc-autonics>



Tomado de (Autonics, n.d.)“L2RR-L3GL – lámpara piloto verde” [Ficha técnica]. Recuperado de <https://www.autonics.com/co/model/L2RR-L3GL>





Tomado de Toma doble Leviton 15 AMP 125 V (producto en línea), Inter Eléctricas S.A.S(S.A.S., n.d.-c). Recuperado de <https://interelectricas.com.co/articulos-electricos/92-toma-leviton-doble-15amp-con-polo-blanca.html>



Tomado de Sylvania (Sylvania, 2024), “LED Toledo A60 10W WW DIM” [Ficha técnica].

Apéndice T. Análisis presupuestal

Análisis de Precios-Presupuesto					
Trabajo de grado Escuela de Ingeniería Mecánica Universidad Industrial de Santander				Fecha	3/10/2025
Diseño de un banco de pruebas de laboratorio para generación de energía eléctrica emplenado una turbina michell Banki					
Código	Descripción del sistema				
SS001	Sistema Bastidor-Estructura Banco				
Código	Descripción del Material y Transporte	Cant	UND	Precio U	Total
MT1_001	Tubos cuadrados de 2" x 6m	3	UND	\$ 93.879	\$ 281.637
MT1_002	Tubos cuadrados 1.5" X 6m	2	UND	\$ 34.749	\$ 69.498
MT1_003	Soldadura 6013	10	kg	\$ 20.979	\$ 209.790
MT1_004	Lamina hot rolled 1/8"	2	m2	\$ 92.692	\$ 185.384
	Transporte			\$	90.000
	Subtotal de Materiales y Transporte			\$	836.309
	IVA			\$	158.899
	Total			\$	995.208
Código	Descripción Mano de Obra	Cant	UND	Precio U	Total
MO1_001	Técnico electromecánico (1 persona)	30	hora	\$ 7.400	\$ 222.000
	Subtotal de MO			\$	222.000
	Total subsistema			\$	1.217.208
Código	Descripción del sistema				
SS002	Sistema Hidráulico y Turbina				
Código	Descripción del Material y Transporte	Cant	UND	Precio U	Total
MT2_001	Tanque	1	UND	\$ 545.281	\$ 545.281
MT2_002	Accesorio tipo salida de tanque PAVCO	1	UND	\$ 11.259	\$ 11.259
MT2_003	Tubería PVC PAVCO 1"	3	m	\$ 4.563	\$ 13.689
MT2_004	Unión universal	2	UND	\$ 8.580	\$ 17.160
MT2_005	Bomba CPM 650M Pedrollo	1	UND	\$ 1.327.590	\$ 1.327.590
MT2_006	Codos 90° 1" PAVCO	3	UND	\$ 1.499	\$ 4.497
MT2_007	Válvula de globo Enolgas	1	UND	\$ 21.206	\$ 21.206
MT2_008	Indicador de presión ABZMM100-10 BAR/PSI-U/B-G Rexroth	1	UND	\$ 280.000	\$ 280.000
MT2_009	Accesorio tipo tee PVC 1" x ½" PAVCO	1	UND	\$ 4.455	\$ 4.455
MT2_010	Indicador de caudal PIUSI K24	1	UND	\$ 194.400	\$ 194.400
	Transporte			\$	390.000,00
	Subtotal de Materiales y Transporte			\$	2.809.537
	IVA			\$	533.812
	Total			\$	3.343.349
Código	Descripción Mano de Obra	Cant	UND	Precio U	Total
MOT2_001	Técnico Electromecánico	16	hora	7.400	\$ 118.400,00
	Subtotal de MO			\$	118.400,00
	Total subsistema			\$	3.461.749,03

Código		Descripción del sistema			
SS003		Sistema Eléctrico y Generación			
Código	Descripción del Material	Cant	UND	Precio U	Total
MT3_001	Alternador Mecc Alte Eogen	1	UND	\$ 2.600.000	\$ 2.600.000
MT3_002	Piloto luminoso verde 110V Artonics	1	UND	\$ 14.580	\$ 14.580
MT3_003	Piloto luminoso rojo 12V Artonics	1	UND	\$ 7.290	\$ 7.290
MT3_004	Fuente de 110VAC-12VDC CZELE FSCR6012	1	UND	\$ 47.020	\$ 47.020
MT3_005	Tomacorriente 110V Leviton	2	UND	\$ 2.795	\$ 5.590
MT3_006	Bombilla 110V Sylvania	1	UND	\$ 10.449	\$ 10.449
MT3_007	Panel multímetro digital ALAMSCN	1	UND	\$ 24.300	\$ 24.300
MT3_008	Canaleta Ranurada Dexson	0,6	m	\$ 24.369	\$ 14.621
MT3_009	Rien DIN OMEGA	0,5	m	\$ 7.563	\$ 3.782
MT3_010	Bloque de distribución de 3 barras 2171 Onka	1	UND	\$ 24.985	\$ 24.985
MT3_011	Cable vehiculo #18AWG para tensión DC procables Cu-multiflex	6	m	\$ 2.106	\$ 12.636
MT3_012	Cable de cobre #3x14AWG para 110V procables Cu-Multiflex	3	m	\$ 5.751	\$ 17.253
MT3_013	Bloque de distribución de 2 barras 2081 Onka	1	UND	\$ 17.350	\$ 17.350
MT3_014	Amarres plásticos 10cm x 100	1	bolsa	\$ 6.638	\$ 6.638
MT3_015	Amarres plásticos 20cm x100	1	bolsa	\$ 7.731	\$ 7.731
MT3_016	Freno para montar el riel Onka	6	UND	\$ 3.000	\$ 18.000
MT3_017	Tornillo autoperforante 8x1/2" x100	1	bolsa	\$ 7.200	\$ 7.200
MT3_018	Pin ojo para #14AWG	8	UND	\$ 210	\$ 1.680
MT3_019	Pin hueco para #18AWG	15	UND	\$ 127	\$ 1.905
MT3_020	Conductor verde #14AWG Procables	1	m	\$ 1.400	\$ 1.400
MT3_021	Grapa para manguera coraza 1/2"	3	UND	\$ 798	\$ 2.394
MT3_022	Manguera coraza 1/2"	2	m	\$ 4.243	\$ 8.486
MT3_023	Prensaestopa pg16	1	UND	\$ 1.900	\$ 1.900
MT3_024	Conector cónico para cable #14	2	UND	\$ 850	\$ 1.700
MT3_025	Tablero eléctrico	1	UND	\$ 163.800	\$ 163.800
MT3_026	Señal de peligro electrico	1	UND	\$ 6.302	\$ 6.302
MT3_027	Copia de llave de tablero electrico	1	UND	\$ 4.000	\$ 4.000
MT3_028	Protección eléctrica ABB 1x16	1	UND	\$ 13.365	\$ 13.365
	Transporte			\$	380.000,00
	Subtotal de Materiales y Transporte			\$	3.426.357
	IVA			\$	651.008
	Total			\$	4.077.365
Código	Descripción Mano de Obra	Cant	UND	Precio U	Total
MO3_001	Técnico Electromecánico	28	hora	\$ 7.400,00	\$ 207.200
	Subtotal de MO			\$	207.200
	Total Subsistema			\$	4.284.565
Código		Descripción del sistema			
SS004		Sistema de Transmisión			
Código	Descripción del Material	Cant	UND	Precio U	Total
MT4_001	Polea 2 ranuras SPA 180	1		150.000	\$ 150.000
MT4_002	Polea 2 ranuras SPA 120	1		139.000	\$ 139.000
MT4_003	Correas SPA 1082mm	2		71.280	\$ 142.560
	Transporte			\$	180.000
	Subtotal de Materiales y Transporte			\$	611.560
	IVA			\$	116.196
	Total			\$	727.756
Código	Descripción Mano de Obra	Cant	UND	Precio U	Total
MO4_001	Técnico Electromecánico	6	hora	\$ 7.400	\$ 44.400
	Subtotal de MO			\$	44.400
	Total MO			\$	772.156
Costos Totales del Proyecto					
	Costos Totales asociados a Materiales y Transporte			\$	9.143.678
	Costos Totales asociados a Mano de obra			\$	1.319.756
	Imprevistos Generales (5%)			\$	523.172
	Precio Total Final			\$	10.986.606

Elaboración propia

alternador y suministrará en el tablero eléctrico.		dañada		Porque se hizo mal la instalación o el empalme de la cometa con la protección		Porque se usaron materiales inadecuados		el tablero no recibe energía		dañar la protección o la fuente																
B	Se dañaron componentes internos del tablero	1	No se suministra energía a componentes electrónicos a 12V	Porque la fuente está quemada	Porque hubo sobrecargas del sistema	Por mala operación en el alternador																				
				Porque el bloque de distribución de 12V está mal conectado	Porque hay una mala conexión del conector en el bloque	Porque el pin de conexión está suelto																				
				Porque la fuente está dañada	Porque hubo sobrecargas del sistema	Por mala operación en el alternador																				
				Porque el bloque de distribución de 110V está mal conectado	Porque hay una mala conexión del conector en el bloque	Porque el pin de conexión está suelto																				
		2	No se suministra energía a componentes a 110V	Bloqueo mecánico de la transmisión	Porque un objeto extraño se ha incrementado en poleas o correa	Por que el área de trabajo tiene contaminantes particulados	Porque no se ha establecido un procedimiento de limpieza regular para el área de trabajo.																			
					Porque la correa ha excedido su vida útil repetidamente	Porque la correa ha sufrido desgaste excesivo	Por que el área de trabajo tiene contaminantes particulados	Porque no se ha establecido un procedimiento de limpieza regular para el área de trabajo.																		
					Porque no se revisó el estado de la correa para su respectivo cambio	Porque no se contempla un cambio cíclico de la correa en un plan de mantenimiento																				
					Porque la correa está sometida a una tensión incorrecta	Porque no se utilizó la herramienta adecuada para medir y ajustar la tensión de la correa	Porque el personal encargado no tenía acceso a las herramientas necesarias o no estaba capacitado en su uso.	Por que no se cuenta con la herramienta específica para medir la tensión de las correas																		
A	No está transmitiendo potencia	3	Destramiento de la correa	Porque no se revisó el nivel de tensión en operación	Porque no se tiene establecido un plan de mantenimiento preventivo para el ajuste de tensión en correas																					
				Porque la correa no fue instalada correctamente	Porque la correa no ha sido reemplazada a tiempo	Porque el personal encargado no tenía acceso a las herramientas necesarias.	Por que no se cuenta con la herramienta específica para medir la tensión de las correas																			
				Porque la correa no tiene una tensión adecuada	Porque la correa ha presentado desgaste	Porque no se contempla un cambio cíclico de la correa en un plan de mantenimiento																				
				Porque no se revisó el nivel de tensión en operación	Porque no se tiene establecido un plan de mantenimiento preventivo para el ajuste de tensión en correas																					
		4	Fallo en rodamientos del eje de la turbina	Porque los rodamientos han sido expuestos a cargas para las que no fueron diseñados	Porque se ha llevado a cabo una sobrecarga en el eje de la turbina	Porque ha habido cambios en el proceso operativo sin ajuste de los rodamientos																				
					Porque el eje de la turbina se encantró desalineado	Porque no se contempla una tarea de mantenimiento para la verificación y ajuste del alineamiento del eje de la turbina																				
					Porque el eje principal presenta vibraciones excesivas o anormales	Porque hay un desequilibrio en poleas o eje	Porque la polea o el eje tienen desgaste o ruptura que generan el desequilibrio																			
					Porque los rodamientos se encuentran desgastados o en falla total	Porque las poleas se encuentran desalineadas	Porque no se contempla una tarea de mantenimiento para la verificación y ajuste del alineamiento de las poleas																			

Sistema de transmisión: Su

Apéndice V. Guía de laboratorio de generación de energía

Materia

Fecha

Guía de laboratorio de generación de energía

Objetivo

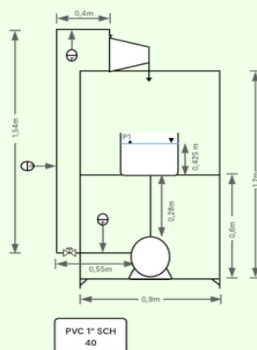
Analizar la conversión de energía eléctrica a partir del funcionamiento de una turbina Michell-Banki acoplada a un generador.

Fundamentos teóricos

- Conversión de energía hidráulica en mecánica y eléctrica
- Potencia hidráulica $P_{hid} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$
- Potencia mecánica $P_{mec} = T \cdot \omega$
- Potencia eléctrica $P_{elec} = V \cdot I \cdot \cos(\theta)$
- Eficiencia de generación $\eta_{gen} = \frac{P_{mec}}{P_{hid}}$

Materiales y equipos

- Banco de pruebas hidráulicas
- Multímetro
- Tacómetro
- Dinamómetro
- Caudalímetro
- Cronómetro
- Termómetro



Procedimiento

1. Poner en funcionamiento el sistema.
2. Medir las RPM del eje de la turbina y del eje del generador con el tacómetro.
3. Verificar la continuidad del sistema eléctrico sin carga, utilizando un multímetro o medidor de fase.
4. Asegurarse de que la válvula o llave de paso esté totalmente abierta.
5. Medir la tensión en las salidas de corriente alterna (AC) con el multímetro.
6. Realizar pruebas con cuatro aperturas diferentes de la válvula: 100%, 75%, 50% y 25%.
7. Observar cuándo el sistema deja de generar energía, ya sea mediante los resultados del analizador de red o visualmente con los pilotos indicadores.
8. Durante la prueba experimental, identificar las RPM mínimas a las que el equipo deja de generar energía.
9. Registrar los valores del analizador de red para cada posición de la válvula o llave de paso.
10. Observar los pilotos luminosos del tablero que indican los niveles de tensión disponibles: 12 V DC y 110 V AC.

Tablas de datos

Ensayo	Inversor (W)	RPM turbina	Tensión DC (V)	Tensión AC (V)	Corriente (A)	Potencia

Análisis de datos

1. Cálculo la eficiencia global del sistema

$$\eta = \frac{P_{AC}}{P_{hid}} \cdot 100\%$$

2. Graficar Voltaje AC vs. carga aplicada, RPM vs. Potencia

Variables y unidades

- ρ , Densidad del agua (kg/m^3), normalmente $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$.
- g , Aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2).
- Q , Caudal volumétrico del agua (m^3/s).
- H , Altura neta de carga hidráulica (m).
- T , Torque o par en el eje (N·m).
- ω , Velocidad angular (rad/s).
- V , Tensión o voltaje eléctrico (V).
- I , Corriente eléctrica (A).
- $\cos(\phi)$, Factor de potencia (adimensional, 0–1), que representa el desfase entre voltaje y corriente.



Universidad Industrial de Santander
Escuela de Ingeniería Mecánica
GIEMA
Juan Felipe Martínez Núñez
María José Rangel Vera



Apéndice W. Pérdidas y tuberías

Materia

Fecha

Guía de laboratorio de pérdidas hidráulicas

Objetivo

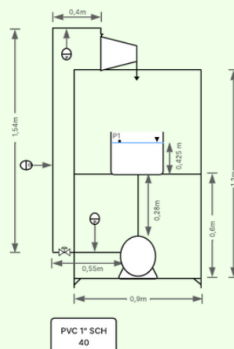
Determinar experimentalmente las pérdidas de energía por fricción y accesorios en un sistema de bombeo y compararlas con valores teóricos calculados.

Fundamentos teóricos

- Ecuación de Bernoulli con términos de pérdidas
- Pérdidas por fricción $h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$
- Pérdidas por accesorios $h_L = K \cdot \frac{v^2}{2g}$
- Número de Reynolds y tipo de flujo

Materiales y equipos

- Banco de pruebas hidráulicas
- Manómetro
- Caudalímetro
- Cronómetro
- Termómetro



Procedimiento

1. Encender la bomba y estabilizar su flujo.
2. Medir el caudal (Q) usando el caudalímetro o método volumétrico.
3. Tomar lecturas de presión en la salida de la bomba y a la entrada de la turbina. $P_1 \neq P_2$ (?)
4. Repetir la prueba para distintos caudales variando la apertura de la válvula reguladora. $v = \frac{Q}{A}$
5. Registrar los datos de presión y caudal teniendo en cuenta la longitud de tubería.
6. Calcular la velocidad del flujo teórica.
7. Calcular las pérdidas a partir de datos obtenidos experimentalmente.

Tablas de datos

# medición	Presión In (P1)	Presión Out (P2)	Caudal (L/s)	Porcentaje de Apertura Valvula (%)

Análisis de datos

1. Calculo de la carga de la bomba

$$H = \left(\frac{P_2}{\rho g} + z_2 \right) - \left(\frac{P_1}{\rho g} + z_1 \right)$$

2. Pérdidas totales

$$h_f + h_L = H - \Delta z - \frac{v^2}{2g}$$

3. Graficar H vs. Q para analizar el comportamiento del sistema

Variables y unidades

- f , Factor de fricción de Darcy (adimensional).
- L , Longitud del tramo de tubería (m).
- D , Diámetro interno de la tubería (m).
- v , Velocidad media del fluido en la tubería (m/s).
- g , Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).
- K , Coeficiente de pérdida del accesorio (adimensional, depende de codos, válvulas, entradas, salidas, etc.).
- Q , Caudal volumétrico (m³/s).
- A , Área de la sección transversal del tubo (m²).
- p_1, p_2 , Presiones en succión (1) y descarga (2) (Pa)
- z_1, z_2 , Cotas geométricas de los puntos 1 y 2 (m)
- Δz , Diferencia de altura geométrica entre descarga y succión (m)



Universidad Industrial de Santander
Escuela de Ingeniería Mecánica
GIEMA
Juan Felipe Martínez Núñez
María José Rangel Vera



Apéndice X. Guía de laboratorio de turbinas hidráulicas

Materia	Fecha
---------	-------

Guía de laboratorio de generación de energía

Objetivo

Analizar la conversión de energía eléctrica a partir del funcionamiento de una turbina Michell-Banki acoplada a un generador.

Fundamentos teóricos

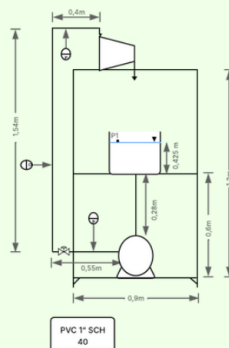
- Conversión de energía hidráulica en mecánica y eléctrica
- Potencia hidráulica $P_{hid} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$
- Potencia mecánica $P_{mec} = T \cdot \omega$
- Potencia eléctrica $P_{elec} = V \cdot I \cdot \cos(\theta)$
- Eficiencia de generación $\eta_{gen} = \frac{P_{mec}}{P_{hid}}$

Materiales y equipos

- Banco de pruebas hidráulicas
- Multímetro
- Tacómetro
- Dinamómetro
- Caudalímetro
- Cronómetro
- Termómetro

Procedimiento

1. Poner en funcionamiento el sistema.
2. Medir las RPM del eje de la turbina y del eje del generador con el tacómetro.
3. Verificar la continuidad del sistema eléctrico sin carga, utilizando un multímetro o medidor de fase.
4. Asegurarse de que la válvula o llave de paso esté totalmente abierta.
5. Medir la tensión en las salidas de corriente alterna (AC) con el multímetro.
6. Realizar pruebas con cuatro aperturas diferentes de la válvula: 100%, 75%, 50% y 25%.
7. Observar cuándo el sistema deja de generar energía, ya sea mediante los resultados del analizador de red o visualmente con los pilotos indicadores.
8. Durante la prueba experimental, identificar las RPM mínimas a las que el equipo deja de generar energía.
9. Registrar los valores del analizador de red para cada posición de la válvula o llave de paso.
10. Observar los pilotos luminosos del tablero que indican los niveles de tensión disponibles: 12 V DC y 110 V AC.



Tablas de datos

Ensayo	Inversor (W)	RPM turbina	Tensión DC (V)	Tensión AC (V)	Corriente (A)	Potencia

Análisis de datos

1. Cálculo la eficiencia global del sistema

$$\eta = \frac{P_{AC}}{P_{hid}} \cdot 100\%$$

2. Graficar Voltaje AC vs. carga aplicada, RPM vs. Potencia

Variables y unidades

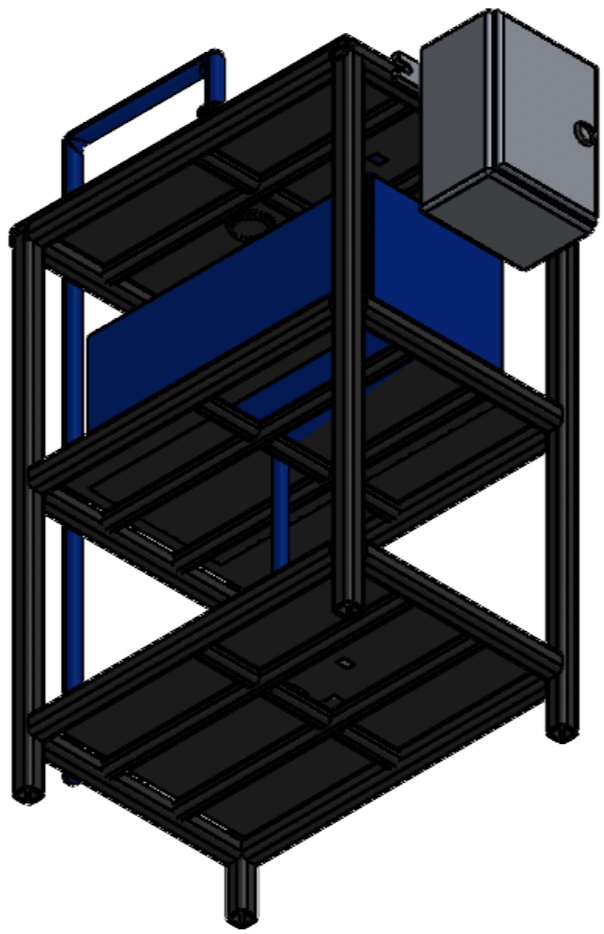
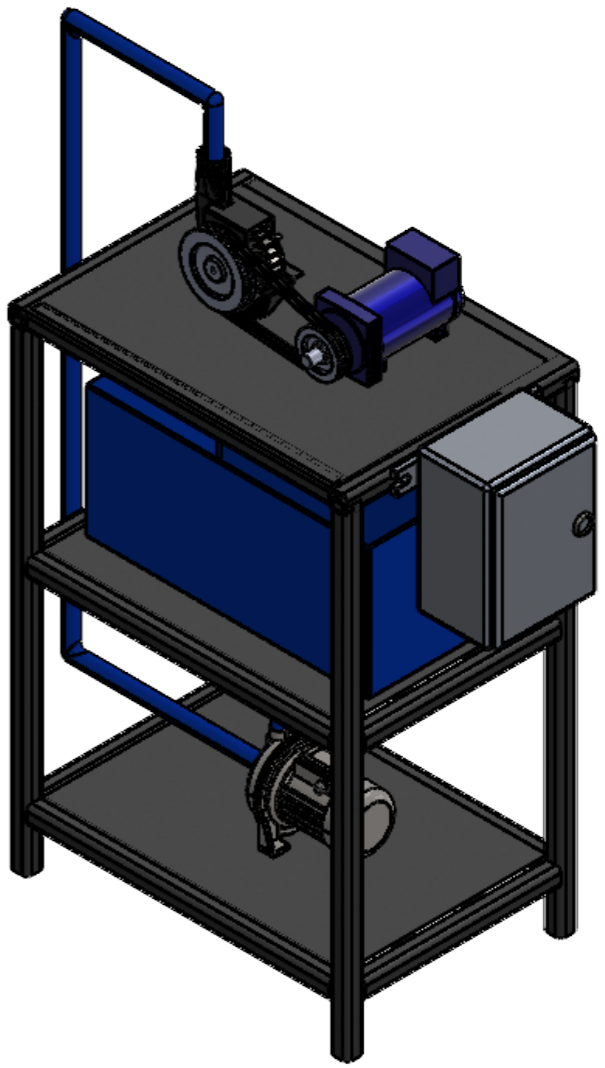
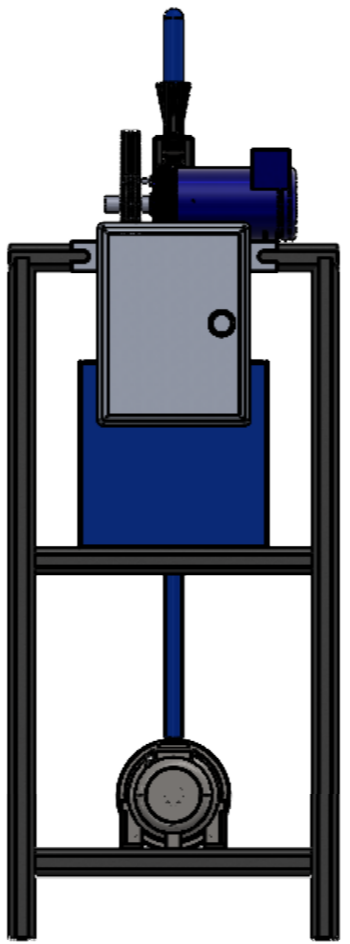
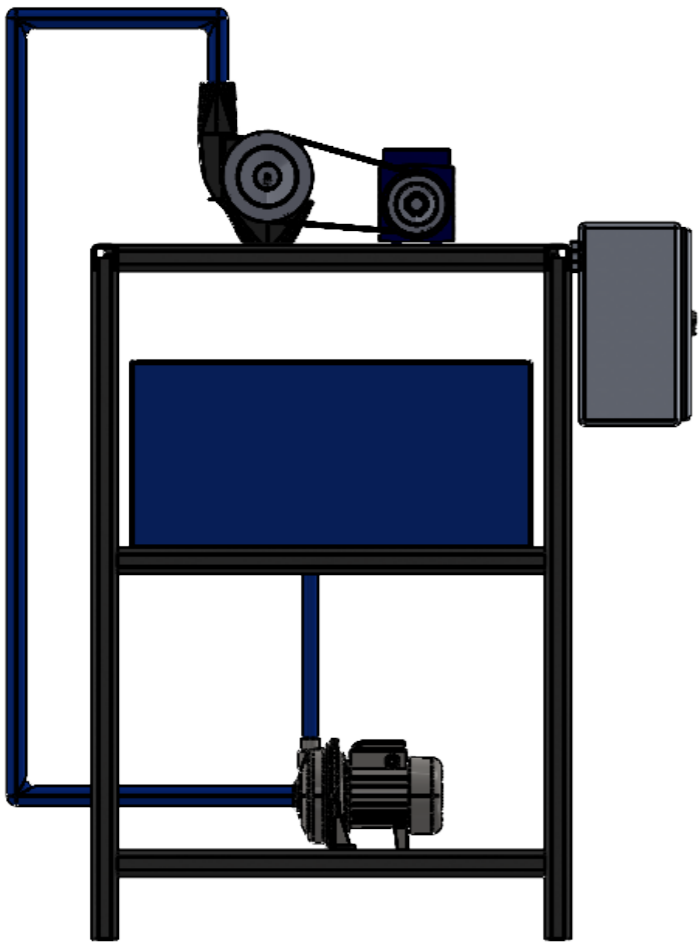
- ρ , Densidad del agua (kg/m^3), normalmente $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$.
- g , Aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2).
- Q , Caudal volumétrico del agua (m^3/s).
- H , Altura neta de carga hidráulica (m).
- T , Torque o par en el eje (N·m).
- ω , Velocidad angular (rad/s).
- V , Tensión o voltaje eléctrico (V).
- I , Corriente eléctrica (A).
- $\cos(\phi)$, Factor de potencia (adimensional, 0–1), que representa el desfase entre voltaje y corriente.





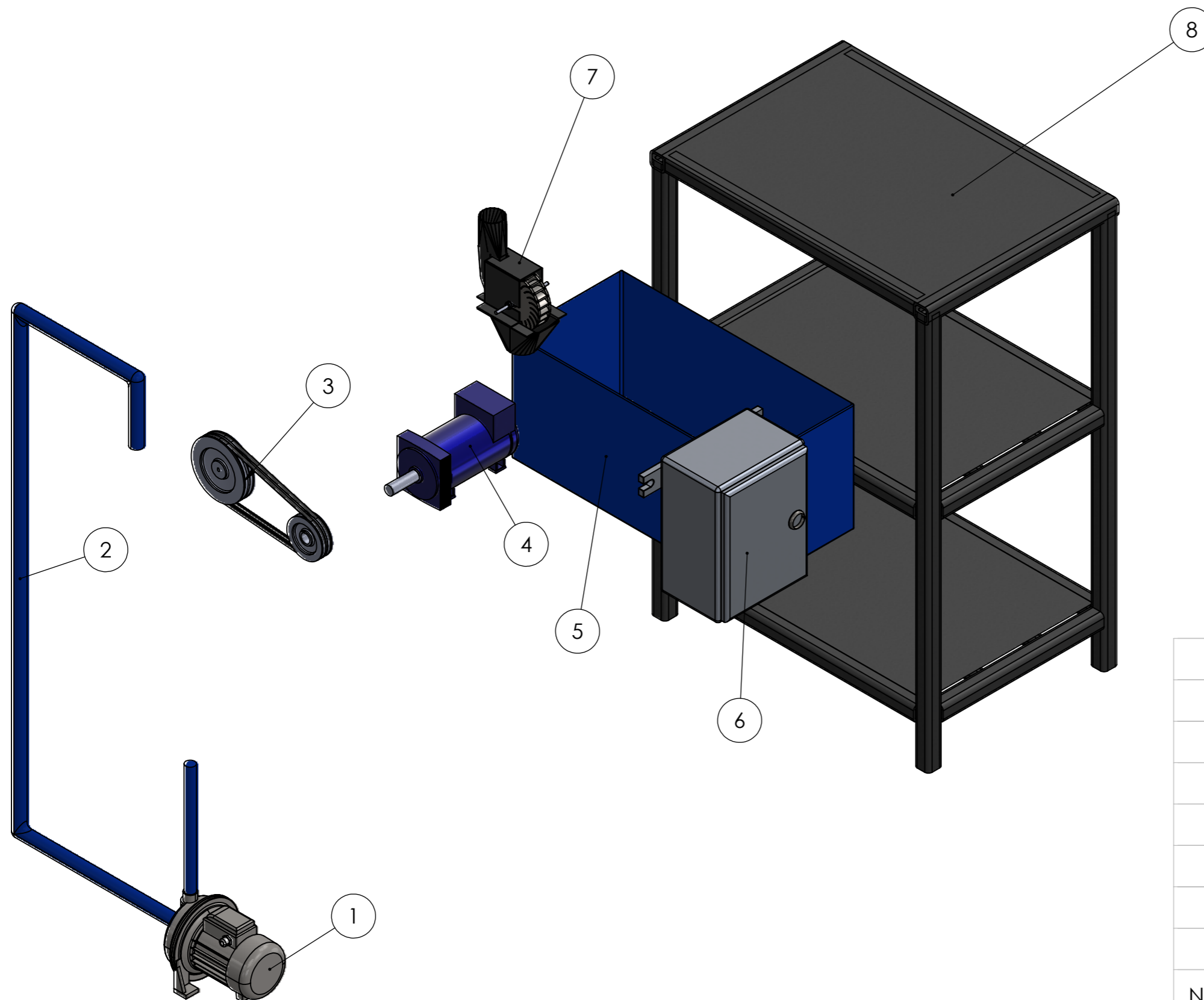
Universidad Industrial de Santander
Escuela de Ingeniería Mecánica
GIEMA
Juan Felipe Martínez Núñez
María José Rangel Vera



Apéndice Y. Planos banco de pruebas

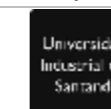


 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 03/10/2025		TITULO: Banco de pruebas Turbina Michell-Banki	
ESCALA: 1:15		Plano General en vista real	
UNIDADES: mm		AUTOR: María José Rangel Vera - 2202298 Juan Felipe Martínez Núñez -2202311	
A3		REVIS: Manuel Salvador Acosta	HOJA 1/8



8	Bastidor	1
7	Turbina Michell-Banki	1
6	Tablero eléctrico	1
5	Tanque	1
4	Alternador MECC ALTE EOGEN	1
3	Sistema de transmisión	1
2	Tubería de 1" PAVCO	1
1	Bomba centrífuga Perolo 650M	1

N° pieza	Descripción	Cantidad
----------	-------------	----------



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 03/10/2025

TITULO: BANCO DE PRUEBAS TURBINA MICHELL-BANKI
VISTA DE EXPLOSIONADO

ESCALA: 1:13

UNIDADES: mm

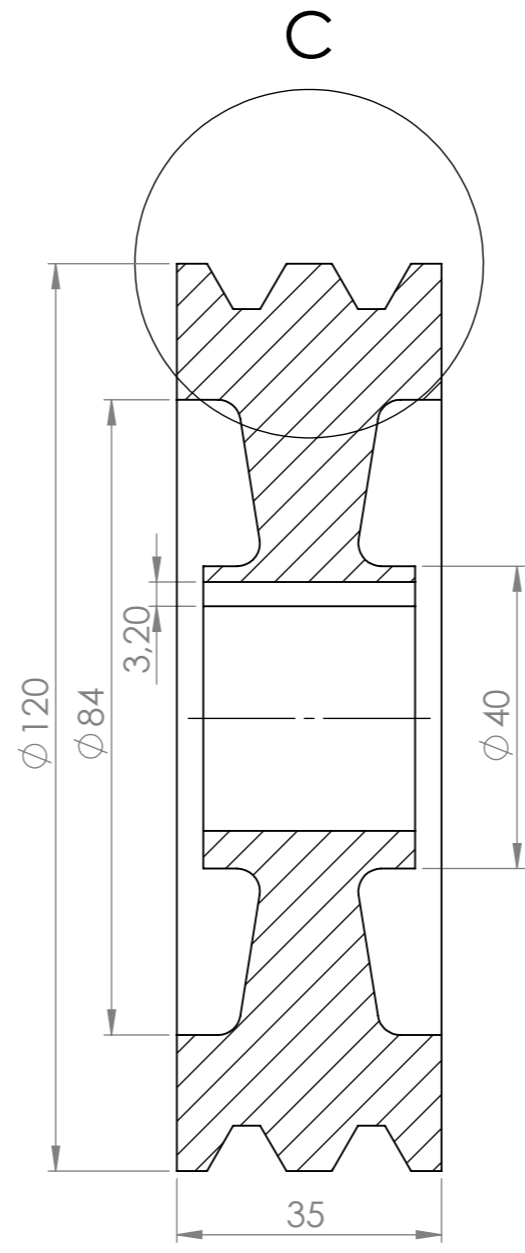
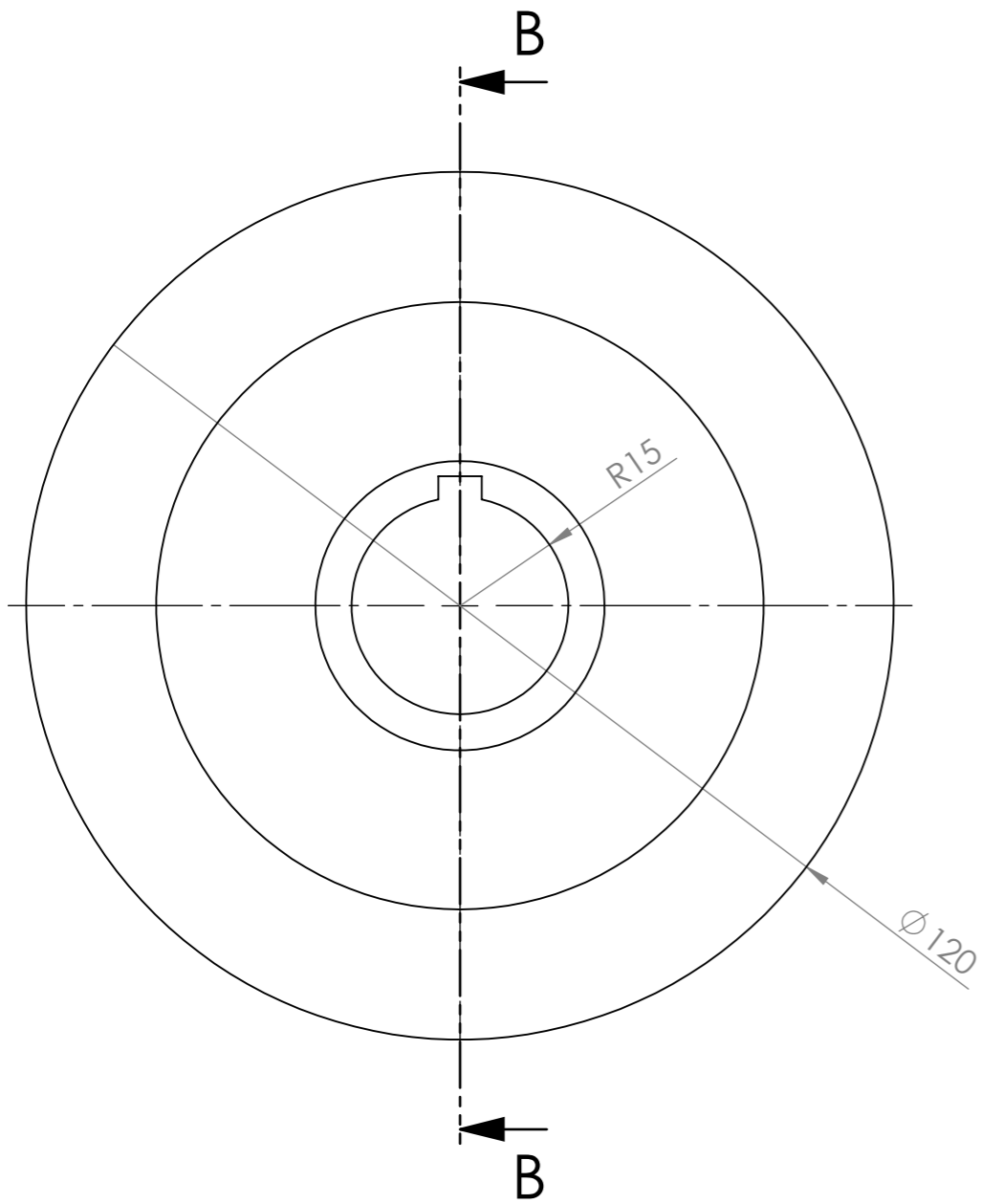
AUTOR: María José Rangel Vera - 2202298
Juan Felipe Martínez Núñez -2202311

A3

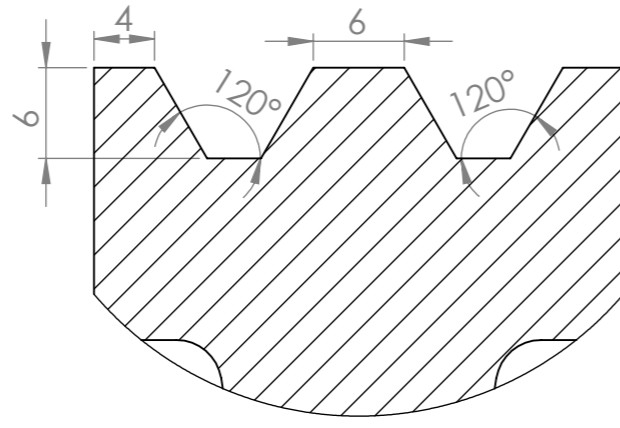


REVISAR: Manuel Salvador Acosta

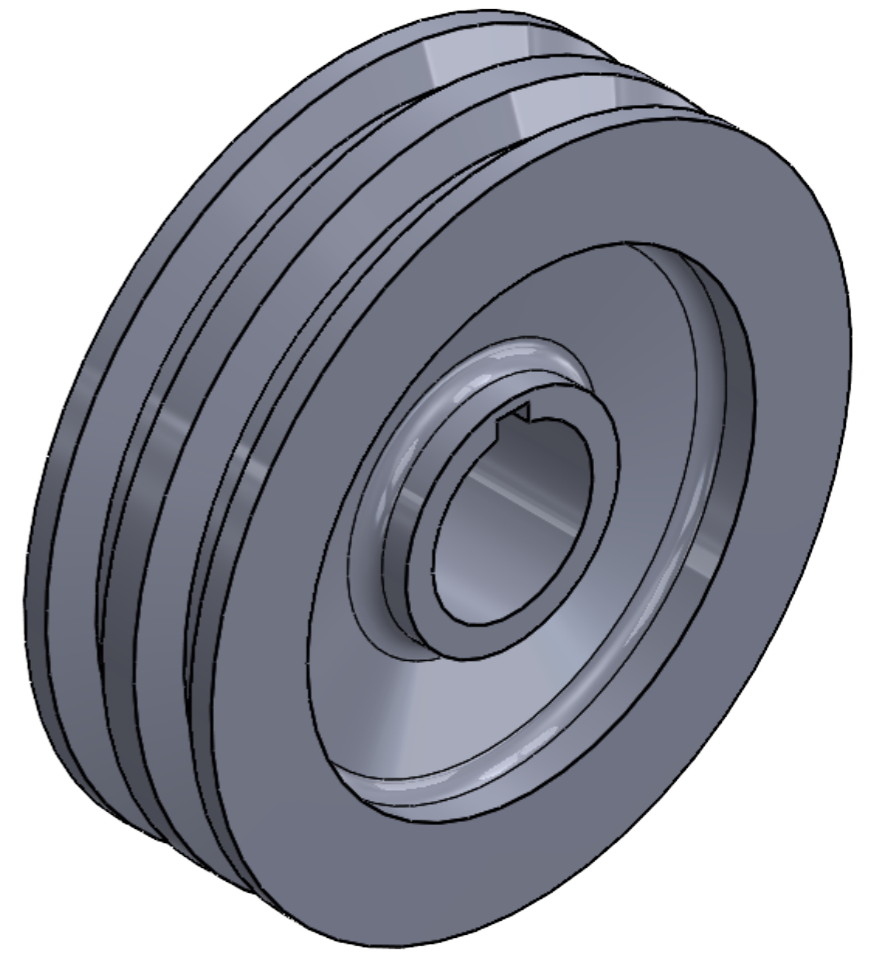
HOJA 2/8



SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 1

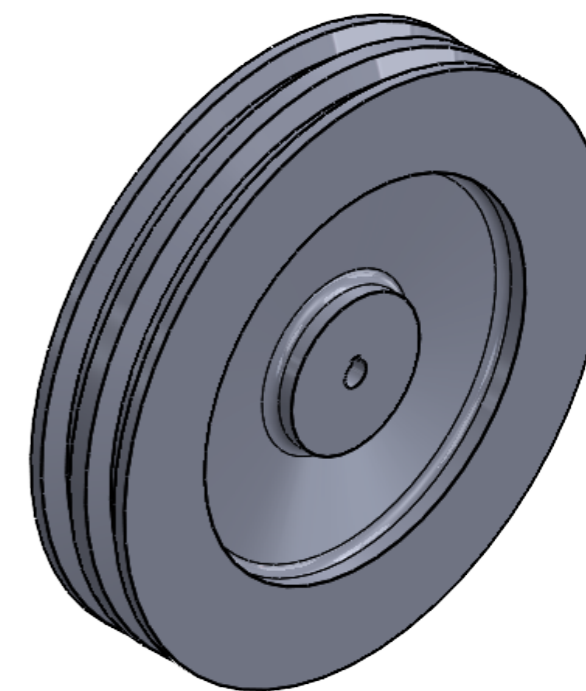
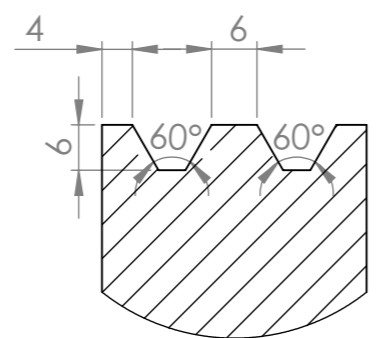
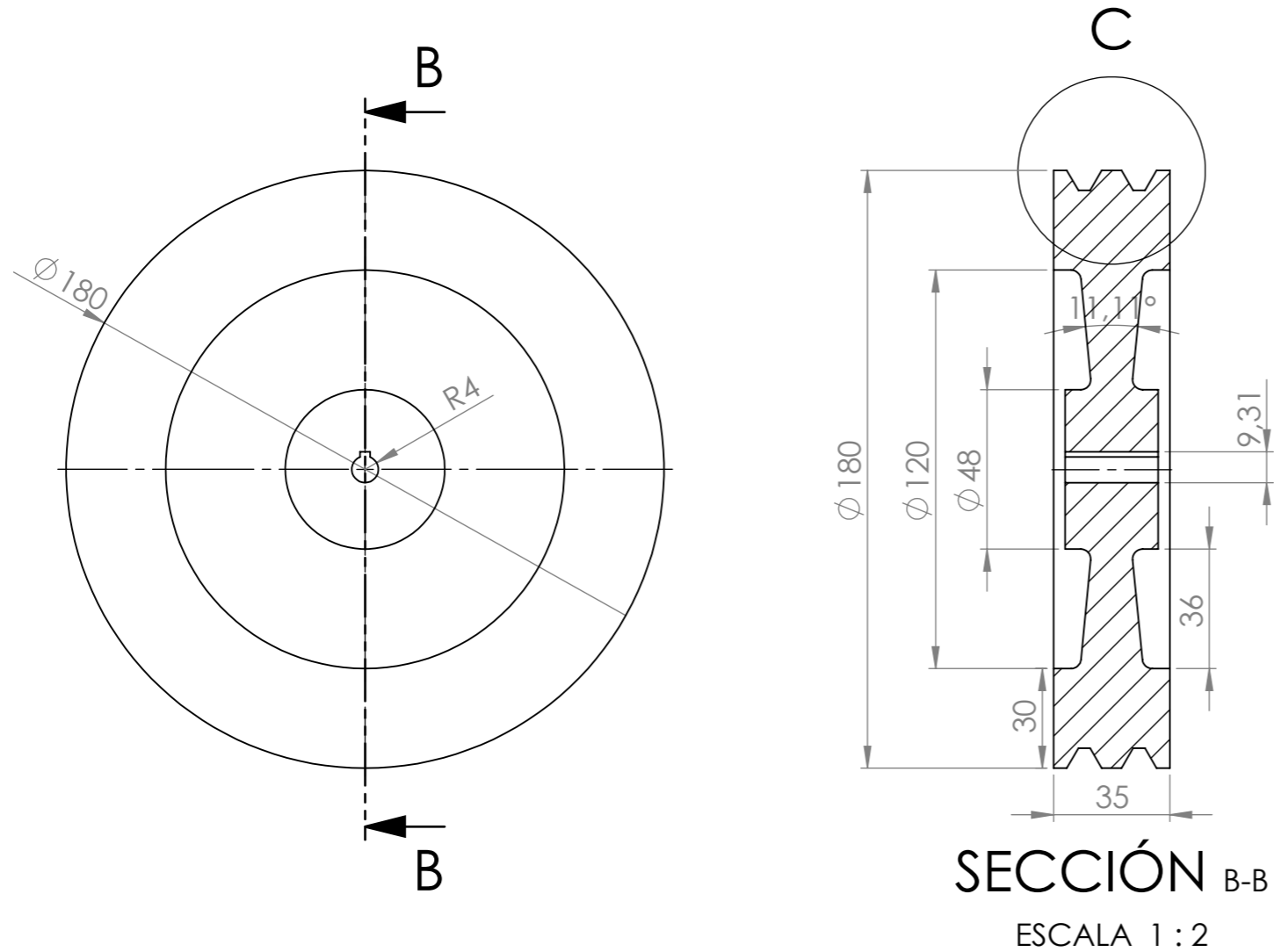


DETALLE C
ESCALA 2 : 1



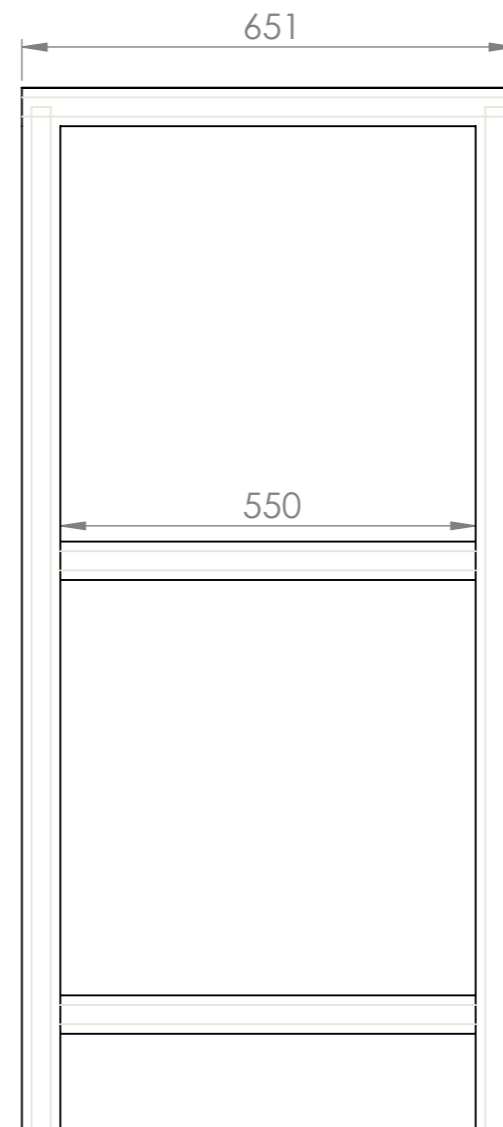
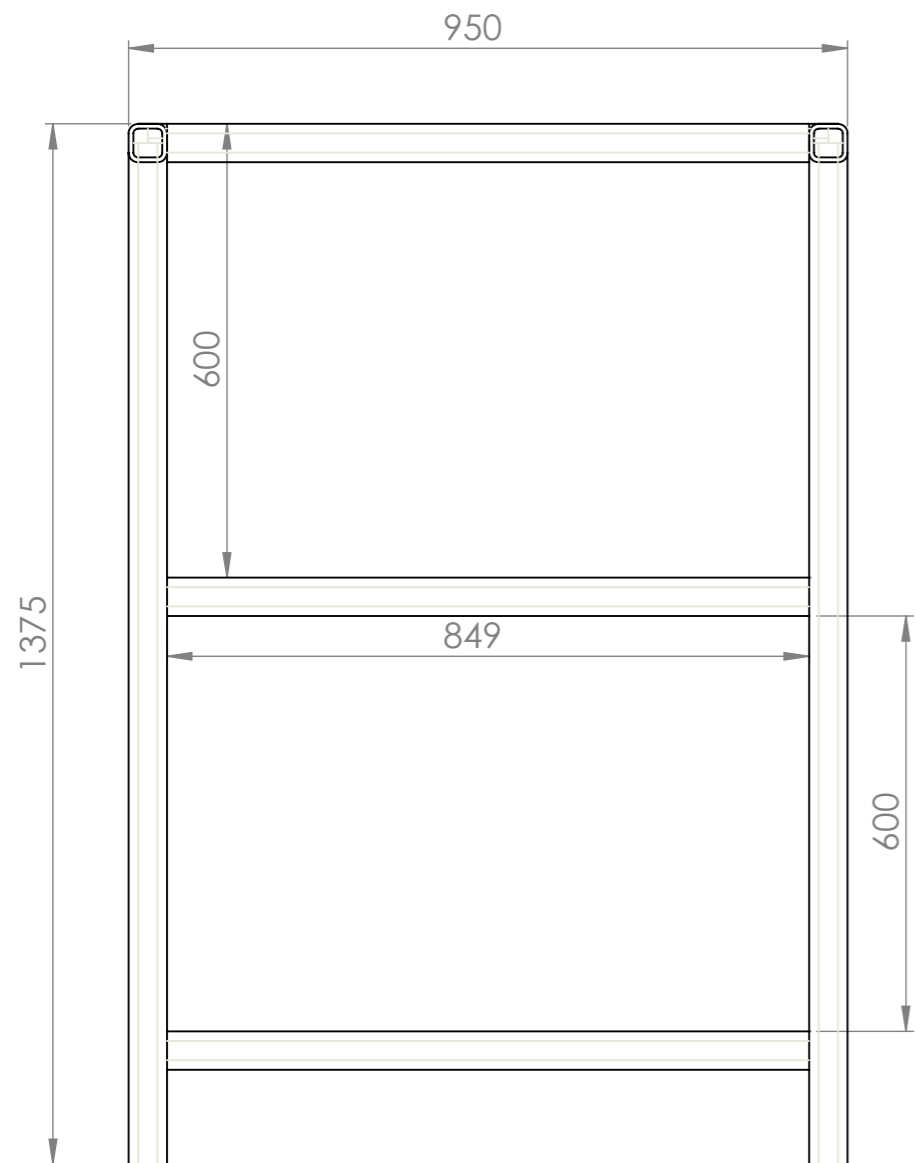
Escala
1:1




		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 03/10/2025 ESCALA: 1:1		TITULO: POLEA CONDUcida ISOMETRICA Y VISTAS PRINCIPALES	
UNIDADES: mm		AUTOR: María José Rangel Vera - 2202298 Juan Felipe Martínez Núñez -2202311	
A3		REVIS: Manuel Salvador Acosta	HOJA 3/8

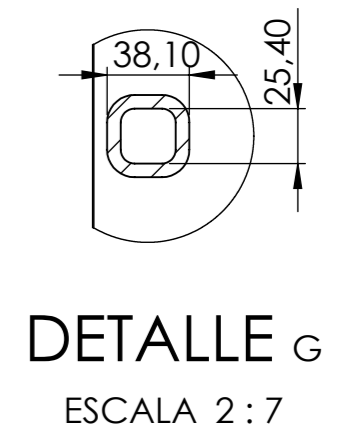
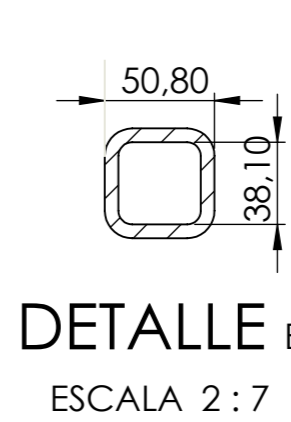
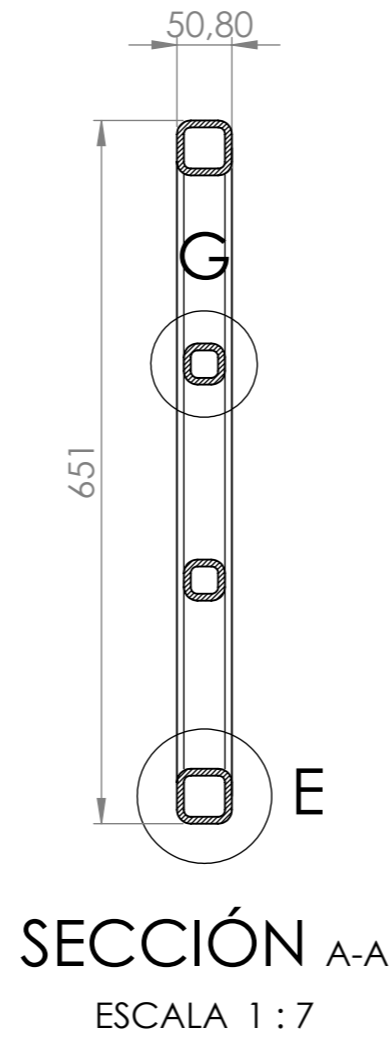
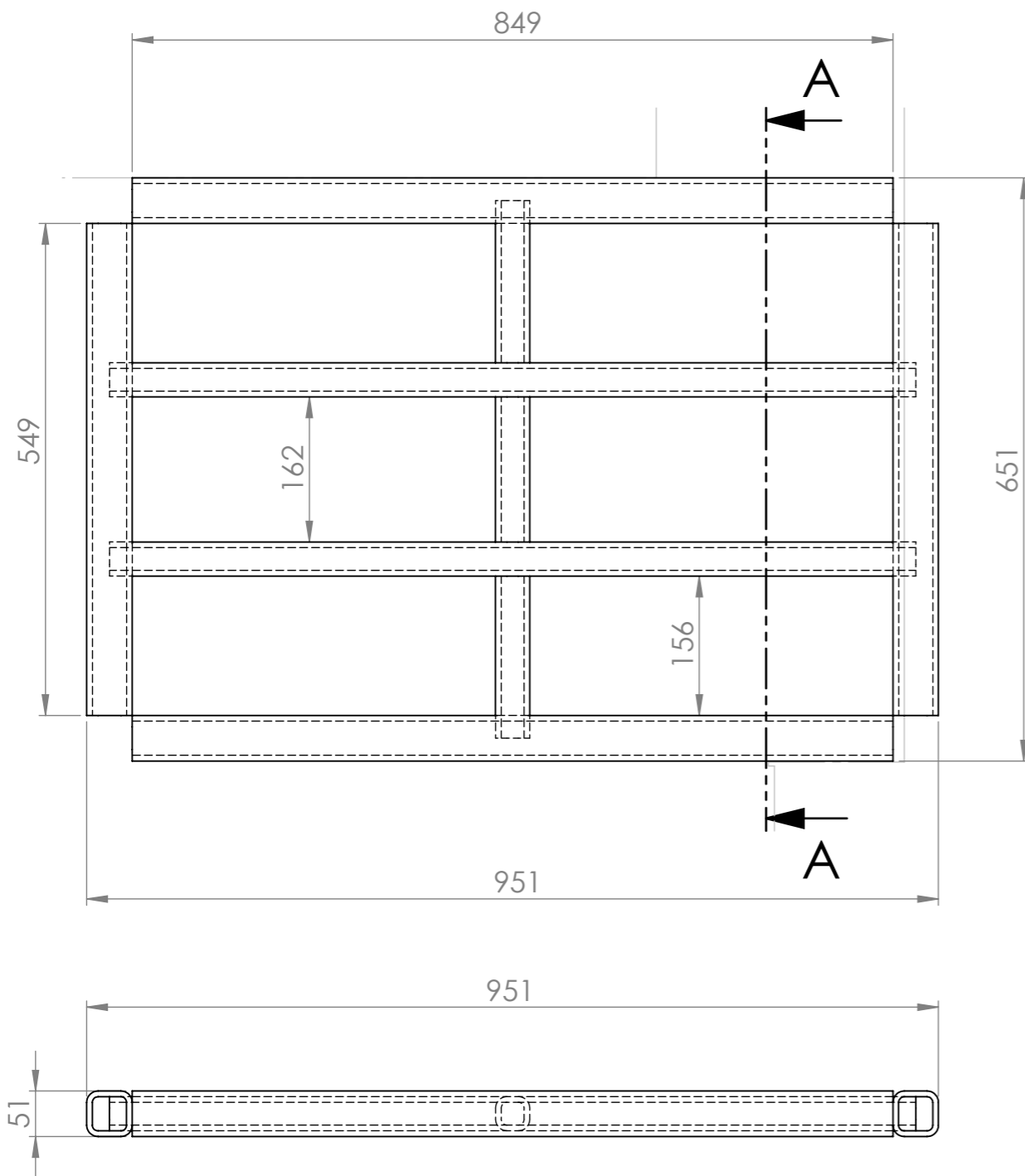
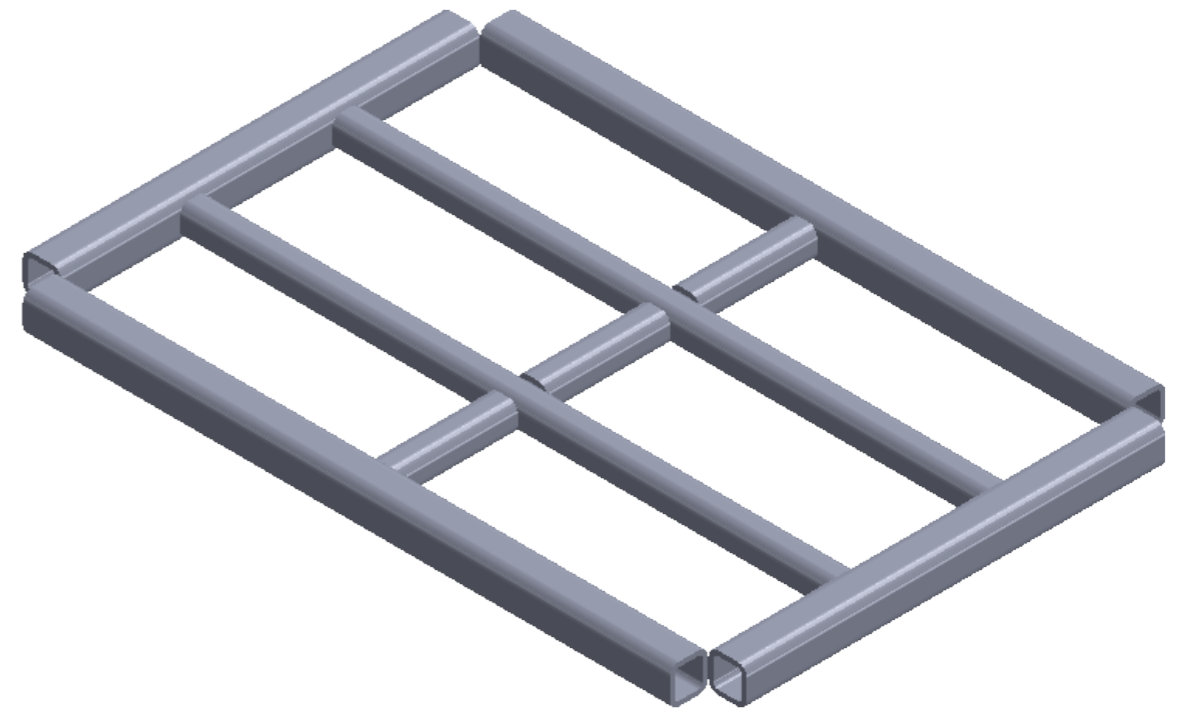



Vista Isométrica
Escala 1:2

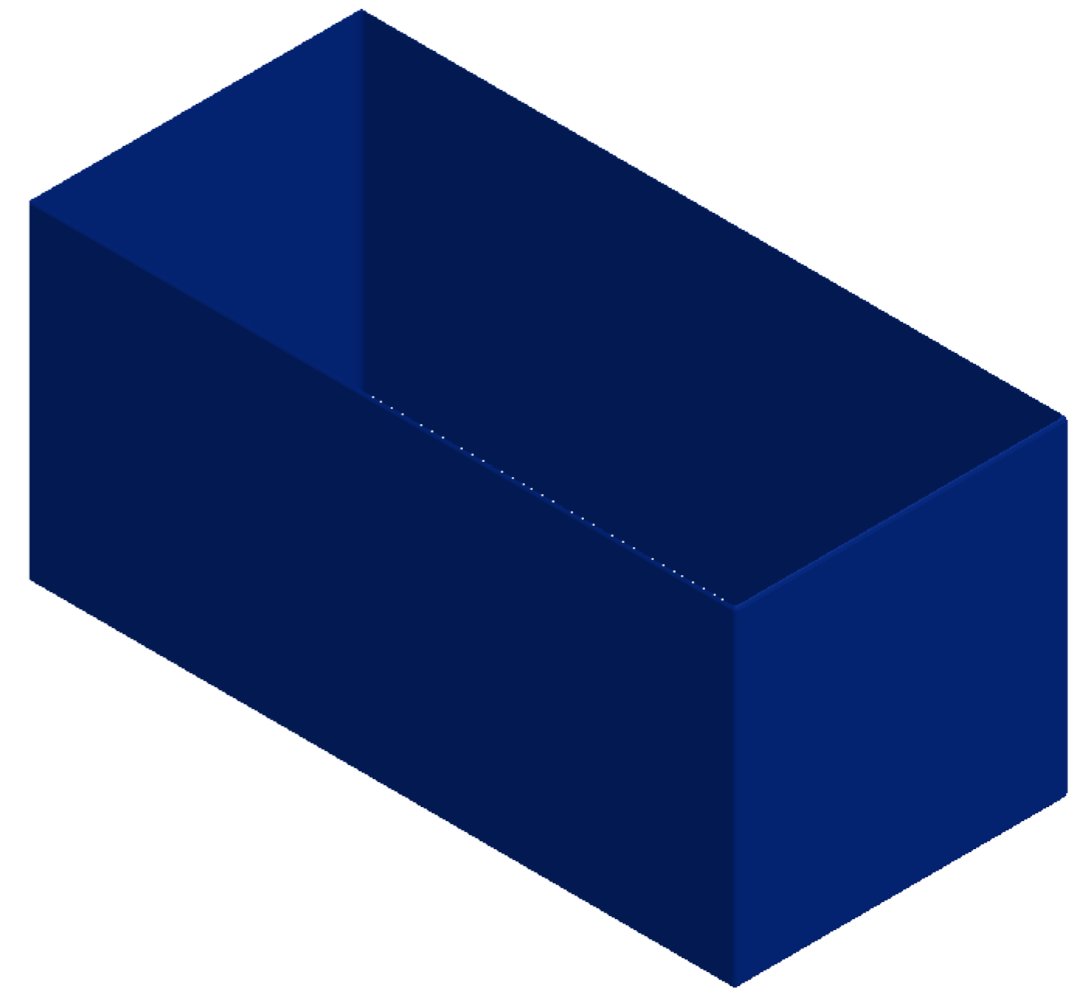
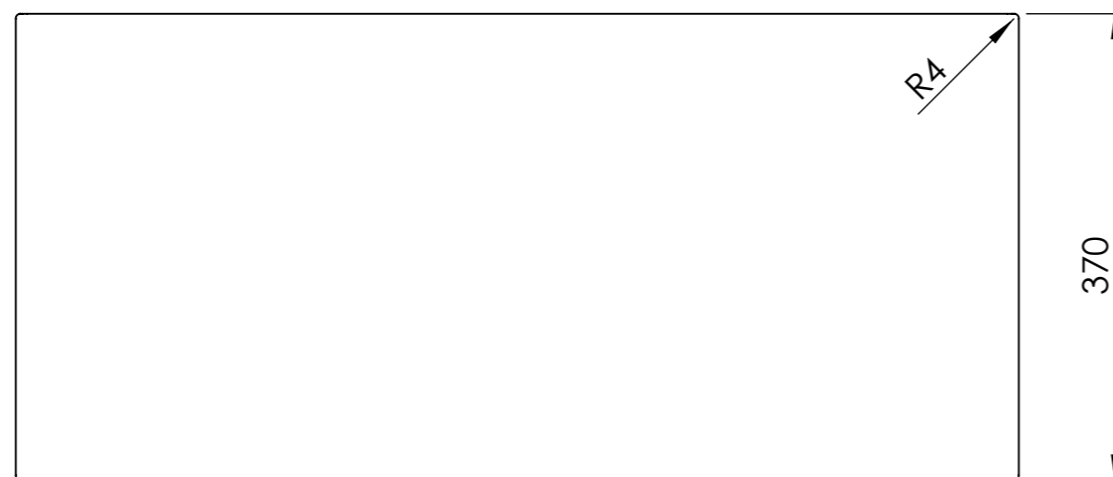
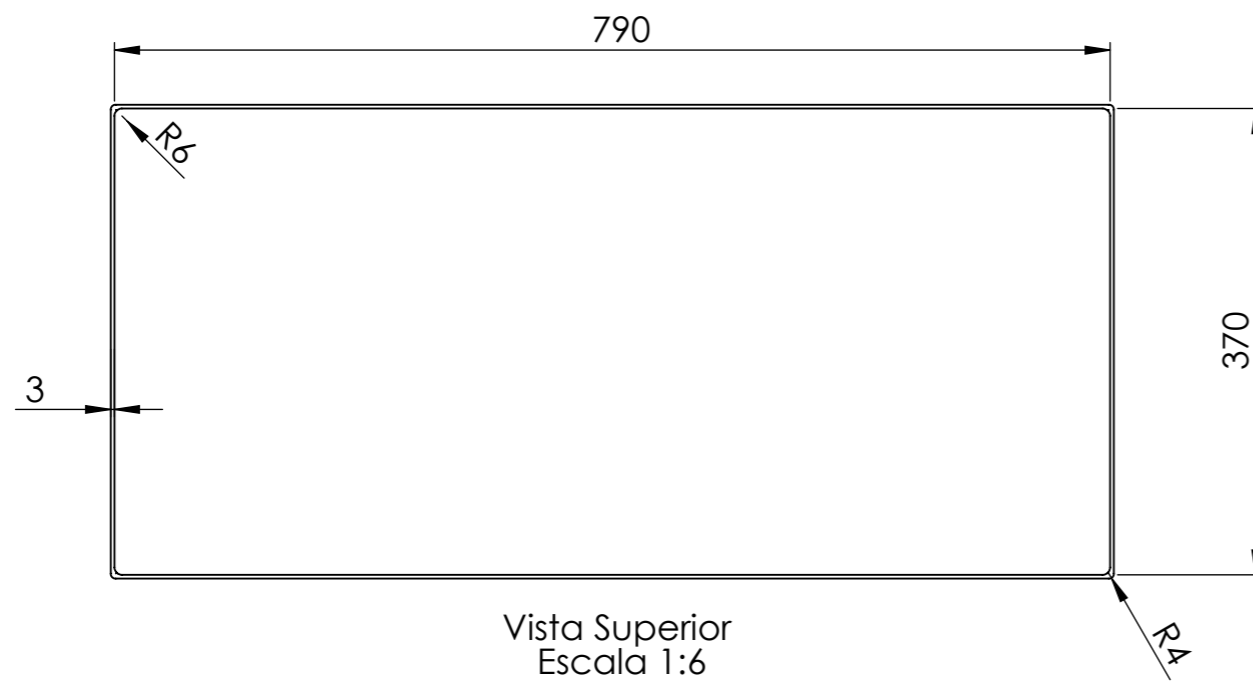
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 03/10/2025		TITULO: POLEA CONDUCTORA ISOMETRICA Y VISTAS PRINCIPALES	
ESCALA: 1:2		AUTOR: María José Rangel Vera - 2202298 Juan Felipe Martínez Núñez -2202311	
UNIDADES: mm		REVIS: Manuel Salvador Acosta	HOJA 4/8
A3			



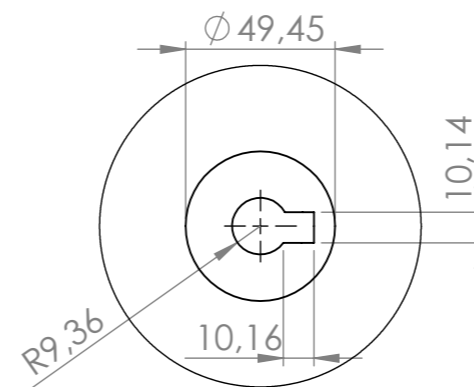
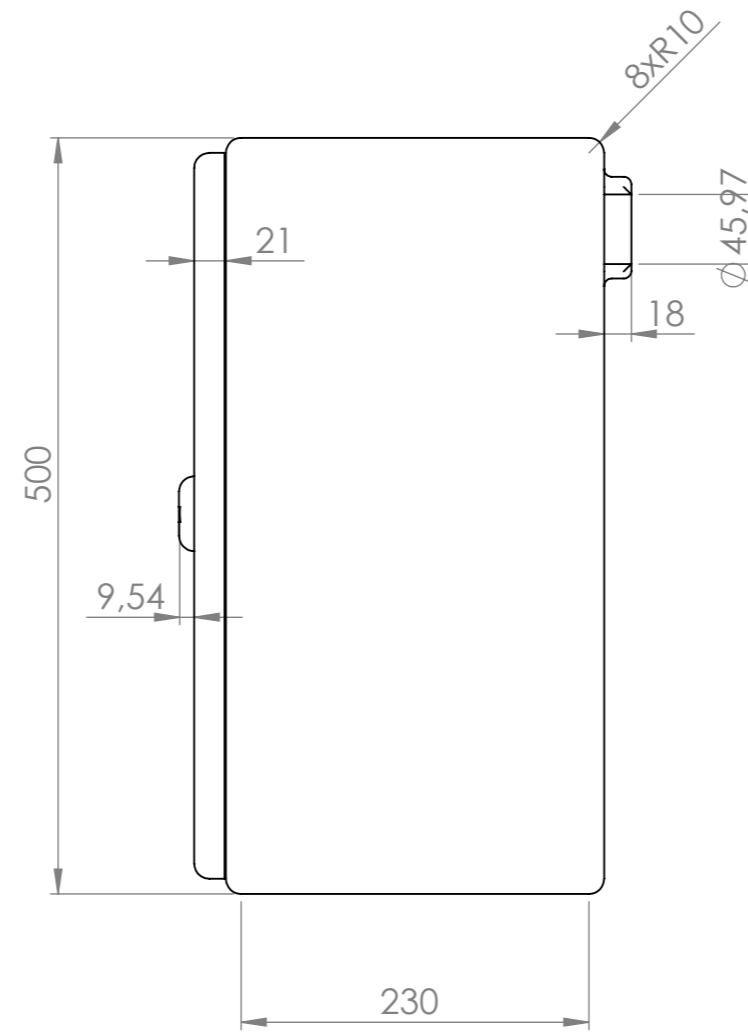
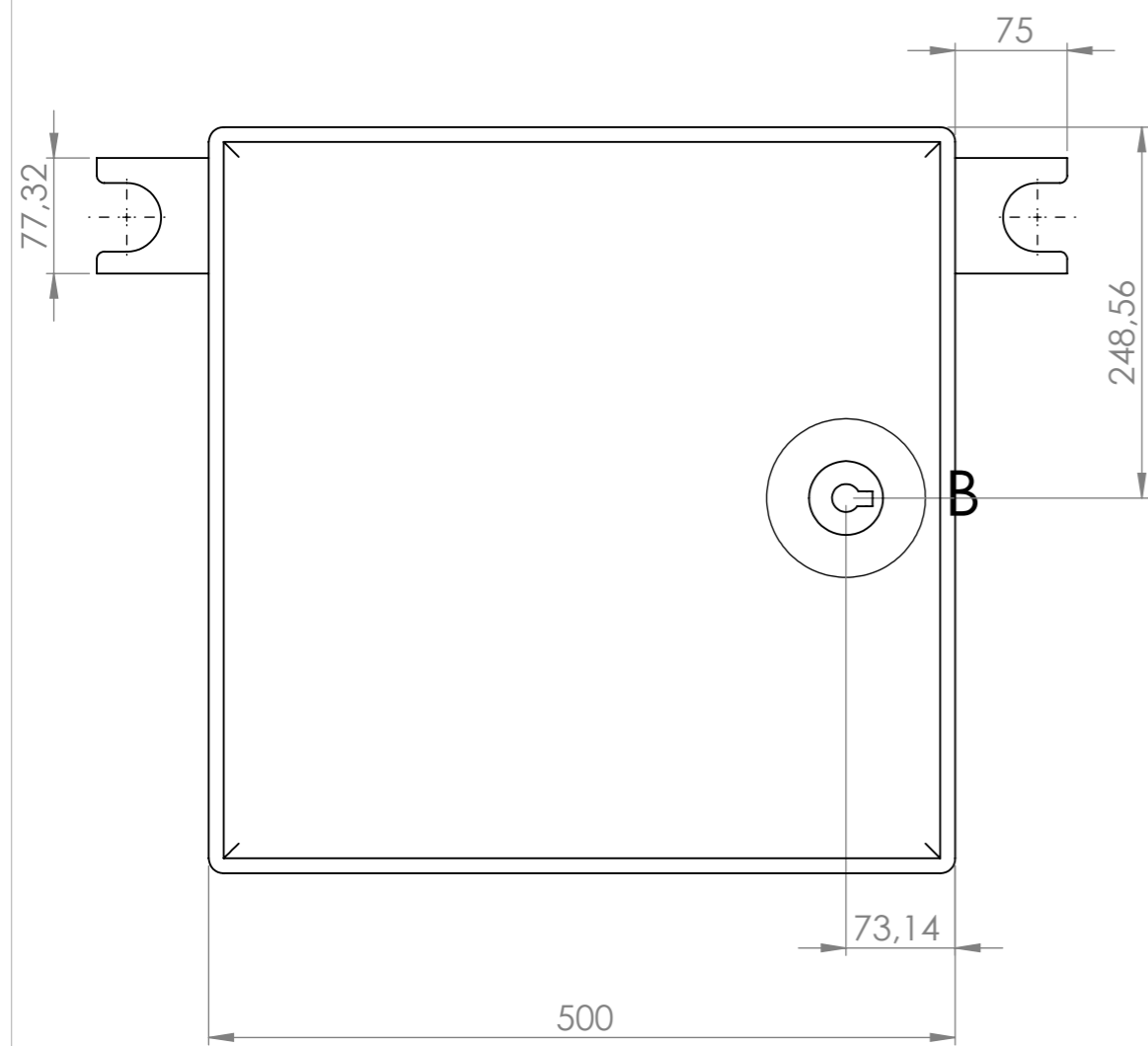
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 03/10/2025		TITULO: Banco de Pruebas Turbina Michell-BANKI	
ESCALA: 1:10		Subsistema Bastidor #1	
UNIDADES: mm		AUTOR: María José Rangel Vera - 2202298 Juan Felipe Martínez Núñez -2202311	
A3		REVIS: Manuel Salvador Acosta	HOJA 5/8



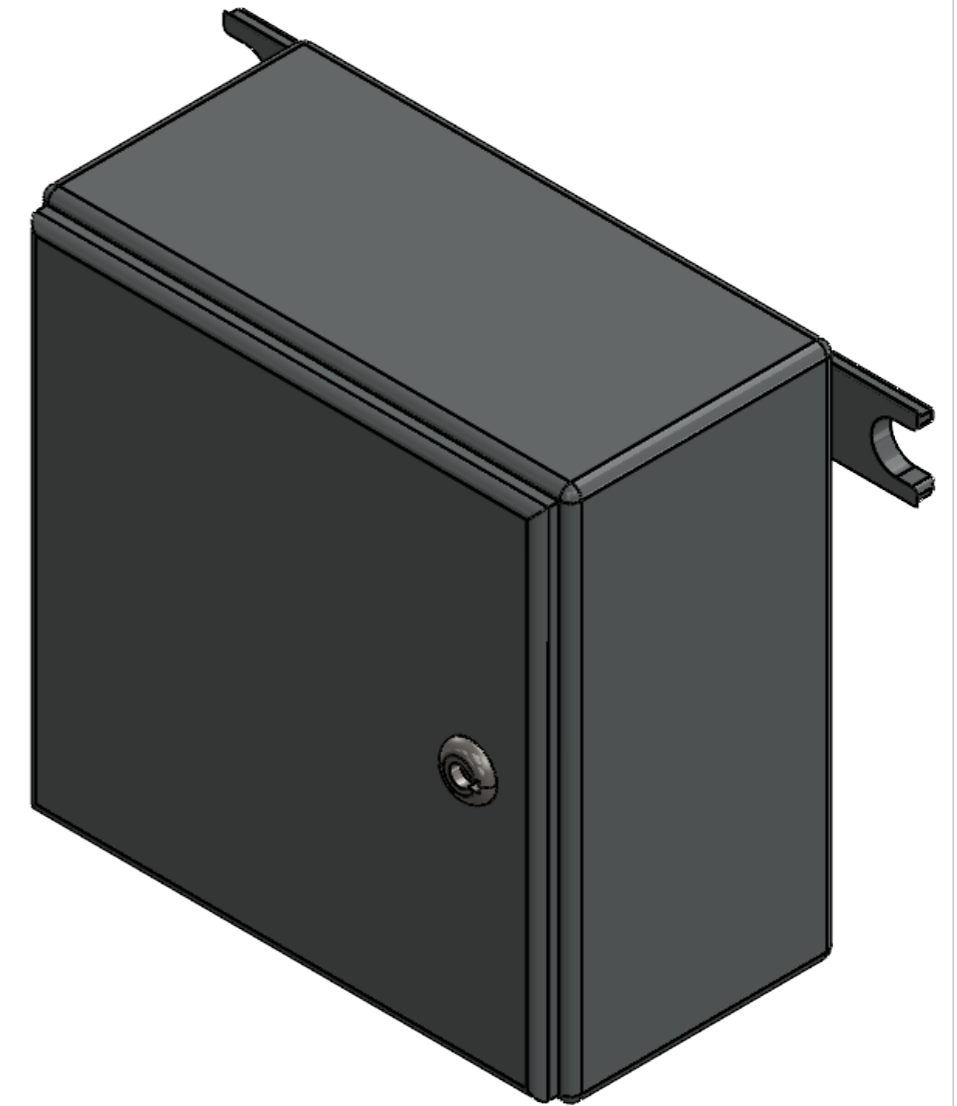
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 03/10/2025		TITULO: BANCO DE PRUEBAS TURBINA MICHELL-BANKI.	
ESCALA: 1:7		SUBSISTEMA BASTIDOR #2.	
UNIDADES: mm		AUTOR: María José Rangel Vera - 2202298 Juan Felipe Martínez Núñez -2202311	
A3		REVISAR: Manuel Salvador Acosta	HOJA 6/8



 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 03/10/2025		TITULO: Banco de pruebas Turbina Michell-Banki	
ESCALA: 1:6		Tanque de Almacenamiento de Agua	
UNIDADES: mm		AUTOR: María José Rangel Vera - 2202298 Juan Felipe Martínez Núñez -2202311	
A3		REVISAR: Manuel Salvador Acosta	HOJA 7/8



DETALLE B
ESCALA 2 : 5



Vista Isométrica
Escala 1:5

		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 03/10/2025		TITULO: Tablero Eléctrico ISOMETRICA Y VISTAS PRINCIPALES	
ESCALA: 1:5		AUTOR: María José Rangel Vera - 2202298 Juan Felipe Martínez Núñez -2202311	
UNIDADES: mm		REVISAR: Manuel Salvador Acosta	HOJA 8/8
A3			