



**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, MODALIDAD PROYECTO
TÉCNICO**

TÍTULO:

**“SIMULACIÓN DE TURBINA HIDROELÉCTRICA MEDIANTE
IMPLEMENTACIÓN DE DINAMÓMETRO DE CUATRO
CUADRANTES EN LABORATORIO DE ELECTRICIDAD”**

AUTORES:

**BAILÓN CAÑARTE JESÚS ROBERTO
FLORES CASTRO GUIDO FERNANDO**

ASESOR ACADÉMICO:

Dr. FERNANDO VLADIMIR JARAMILLO GARCÍA

MANTA -MANABÍ- ECUADOR

2024

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Facultad de ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, certifico:


Haber dirigido y revisado el trabajo de titulación, bajo la modalidad de proyecto técnico, cuyo tema del proyecto es "Simulación de Turbina Hidroeléctrica mediante implementación de Dinamómetro de cuatro cuadrantes en el laboratorio de electricidad", el mismo que ha sido desarrollado de acuerdo a los lineamientos internos de la modalidad en mención y en apego al cumplimiento de los requisitos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico, por tal motivo CERTIFICO, que el mencionado proyecto reúne los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para ser sometido a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

La autoría del tema desarrollado, corresponde a los señores Bailón Cañarte Jesús Roberto y Flores Castro Guido Fernando, estudiantes de la carrera de ingeniería en Electricidad, periodo académico 2024(2), quien se encuentra apto para la sustentación de su trabajo de titulación.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 17 de enero de 2025.

Lo certifico,



Ing. Fernando Vladimir Jaramillo García, PhD


Docente Tutor

AUTORÍA DEL PROYECTO TÉCNICO

Quienes suscribimos, Bailón Cañarte Jesús Roberto, con cédula de identidad N°1312963406 y Flores Castro Guido Fernando, con cédula de identidad N°1312964164, egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Laica “Eloy Alfaro de Manabí”, declaramos que el presente proyecto de titulación es de autoría nuestra, el contenido, resultados y conclusiones obtenidos son de estricta responsabilidad de los autores, teniendo como respaldo citas bibliográficas necesarias para el desarrollo del proyecto, respetando el derecho intelectual de cada autor citado. El patrimonio intelectual de este proyecto de titulación corresponderá a la Universidad Laica “Eloy Alfaro de Manabí”.



Bailón Cañarte Jesús Roberto



Flores Castro Guido Fernando



ASESOR ACADÉMICO

Ing. Jaramillo García Fernando Vladimir. PhD

Dedicatoria

El presente trabajo deseo dedicarlo, en primer lugar, a Dios, el cual ha sido guía y refugio para todos y cada uno de los momentos en el desarrollo del mismo.

A mi familia, por brindarme apoyo y amor incondicional. A mis padres, son mi fuente de inspiración, dado que, con su esfuerzo y sacrificio han logrado ser ejemplo de perseverancia y sabiduría, logrando inculcar la motivación y disciplina necesaria para culminar esta etapa.

A mis amigos y docentes quienes supieron brindarme sus consejos, conocimientos y ánimos en cada una de las etapas académicas. Aprecio mucho el tiempo dedicado a fortalecer mi formación académica

Por último, deseo dedicarles el presente trabajo a todas aquellas personas que, de alguna manera, influyeron en mi etapa universitaria. El presente trabajo será recordatorio del valor de no rendirse y siempre dar un último esfuerzo a pesar de todo.

Bailón Cañarte Jesús Roberto

Dedicatoria

La presente dedicatoria es para las personas más relevantes de mi vida académica y personal. Que han estado apoyándome incondicionalmente en cada paso dado para hacerlo con firmeza y dedicación.

A mi madre, Gabriela Castro por apoyarme en todas las decisiones que he tomado y alentarme cuando he estado por desistir. Su cariño y dedicación que han permitido que esta meta se consiga, siempre estarán presentes en cada logro que alcance.

A mi novia, Ivanna Choez dándome la motivación cuando faltaba, siendo mi fortaleza en los momentos de debilidad impulsando mediante su cariño, celebrando cada pequeño y gran logro conseguido tanto en el ámbito educativo como personal.

A mi hermana, mi abuela, que aún sin esperar nada a cambio me ayudaban y compartían su tiempo para superarme, apoyándome haciendo más amena esta complicada meta. No podría finalizar sin mencionar a mi amiga Jemina Ponce quien me ofreció su tiempo y espacio cuando existían dudas, permitiéndome crecer personalmente para afrontar los desafíos académicos que se me presentaban.

Flores Castro Guido Fernando

Agradecimiento

Queremos agradecer a nuestro tutor de tesis, al Dr. Fernando Vladimir Jaramillo García, sus conocimientos y apoyo fueron fundamentales durante toda nuestra carrera universitaria, no solo como tutor de tesis si no también como docente que, con entusiasmo y dedicación impartía las materias otorgándonos conocimientos de gran calidad para nuestra vida personal y profesional. Durante todo el desarrollo del presente trabajo nos brindó su sabiduría, experiencia y conocimiento para resolver aquellas dudas que se presentaron. Su guía nos encaminó a tener un horizonte vasto.

Por último, expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestros amigos en la academia, por ser una parte esencial de este viaje. Han sido mucho más que compañeros de aula, una fuente de motivación cuando las cosas parecían imposibles y disciplina para las horas dedicadas al aprendizaje. Cada conversación, cada trabajo en equipo, y cada pequeño momento compartido quedará grabado en nuestra memoria como un recordatorio de que esta etapa no habría sido igual sin ustedes.

Bailón Cañarte Jesús Roberto y Flores Castro Guido Fernando

Resumen

Con el avance de la sociedad en diversos aspectos, también ha evolucionado el uso y generación de la energía eléctrica, convirtiéndose en un factor importante para cubrir las necesidades básicas de la población en general. La creciente importancia de las energías renovables determina que la simulación de una turbina hidroeléctrica resulte ser una herramienta efectiva para investigar y desarrollar diversos planteamientos acerca de las energías renovables. La presente investigación tuvo como objetivo: Desarrollar simulación de turbina hidroeléctrica mediante la implementación del dinamómetro de cuatro cuadrantes en laboratorio de electricidad para el análisis de parámetros obtenidos bajo diversas condiciones de funcionamiento. El objetivo planteado se alcanzó a través de una metodología de investigación cuantitativa, no experimental, en donde, se establecieron los parámetros iniciales del dinamómetro, se comparó resultados con simulaciones en los que se varió la inercia y el ángulo de los álabes, interpretando las curvas par-velocidad. Esto permitió estudiar el comportamiento de los cambios teóricos y contrastarlos para cada conjunto individualmente. Se concluyó que el equipo es una herramienta valiosa para el análisis y capacitación en aplicaciones hidroeléctricas y de energías renovables, ya que las variaciones en los parámetros dieron como resultados diferentes comportamientos lo cual es comparable con las condiciones reales de operación de las turbinas hidroeléctricas donde los parámetros no son constantes y el sistema debe adaptarse a los cambios entre la generación y la demanda.

Palabras clave

hidroeléctrica – simulación – dinamómetro – curva

Abstract

According to the evolution of society in various aspects, it has also happened with the use and generation of electrical energy since it was discovered until today it has become a crucial factor to cover the basic needs of the general population. The existence and predominance of renewable energies determines that the simulation of a hydroelectric turbine with various forms of simulation is effective to develop various approaches about renewable energies. The objective of this research was to develop simulation of a hydroelectric turbine by implementing the four-quadrant dynamometer in an electricity laboratory for the analysis of parameters obtained under various operating conditions. The stated objective was achieved through quantitative research methodology. Therefore, the initial parameters of the dynamometer were established, results were compared with simulations in which the inertia and angle of the blade were varied, interpreting the torque-speed curves. Achieving the study of behavior in theoretically based changes, contrasting for each group individually. It was concluded that the equipment is a valuable tool for analysis and training in hydroelectric and renewable energy applications, since, as the parameters varied, we would obtain different results, which can be compared to the real operating conditions of hydroelectric plants where the parameters They are not constant, and the system must adapt to changes between generation and load.

Keyword

hydroelectric – simulation – dynamometer – curve

Índice General

Índice General.....	7
Índice de figuras.....	11
Índice de tablas	12
Tabla de Abreviaturas.....	13
Introducción	15
1. Capítulo I: El Problema	24
1.1. Antecedentes	24
1.2. Justificación.....	25
1.3. Propuesta.....	26
1.4. Problema de Investigación	26
1.5. Árbol de Problemas.....	27
1.6. Árbol de Objetivos	28
1.7. Objeto de la Investigación.....	29
1.8. Campo de Acción	29
1.9. Hipótesis.....	29
1.10. Objetivos	29
1.10.1. Objetivo General	29
1.10.2. Objetivos Específicos.....	29
1.11. Variables.....	29
1.11.1. Tareas de Investigación.....	30
Capítulo II: Marco Teórico	31

2.	Hidroelectricidad.....	31
2.1.	Centrales Hidroeléctricas	31
2.2.	Clasificación de Centrales Hidroeléctricas	33
2.2.1.	Clasificación de Centrales Hidroeléctricas Según su Tipo de Embalse..	33
2.2.2.	Clasificación de Centrales Hidroeléctricas Según su Potencia	36
2.2.3.	Clasificación de Centrales Hidroeléctricas Según la Altura de Salto	37
2.3.	Turbinas hidroeléctricas	39
2.4.	Principio de funcionamiento de turbinas hidroeléctricas	39
2.5.	Tipos de turbinas para Centrales hidroeléctricas.....	41
2.5.1.	Pelton.....	41
2.5.2.	Kaplan	42
2.5.3.	Francis	42
2.5.4.	Componentes de una turbina Francis	43
2.6.	Análisis turbina Francis.....	48
2.6.1.	Ecuación de continuidad	48
2.6.2.	Triángulos de velocidades	49
2.6.3.	Ecuación de Euler.....	52
2.7.	Criterio de selección para rotor de una turbina hidroeléctrica	56
2.8.	Generador síncrono	58
2.9.	Dinamómetro de 4 cuadrantes emulador de turbina hidroeléctrica:	58
2.9.1.	Detalles técnicos.....	59

2.9.2.	Software LVSIM – EMS	60
3.	Capítulo III: Diseño del Proyecto	61
3.1.	Metodología	61
3.1.1.	Descripción del módulo dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes	62
3.1.2.	Parámetros de función - Emulador de turbina hidráulica.....	62
3.1.3.	Especificaciones técnicas del módulo	64
3.2.	Selección de Instrumentos y Equipos.....	66
3.2.1.	Módulo dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes (8960-F):	66
3.2.2.	Módulo fuente de alimentación variable (8525-20).....	67
3.2.3.	Módulo alternador/motor síncrono (8241).....	68
3.2.4.	Módulo de cargas resistivas (8311-05)	69
3.2.5.	Módulo de cargas inductivas (8321-06).....	70
3.2.6.	Multímetro Digital.....	71
3.2.7.	Pinza amperimétrica	71
3.2.8.	Conectores tipo banana	72
3.3.	Procedimiento de las Prácticas	73
3.3.1.	Práctica 1: Turbina hidroeléctrica en vacío.....	74
3.3.2.	Práctica 2: Turbina hidroeléctrica utilizando banco de resistencias	74
3.3.3.	Práctica 3: Turbina hidroeléctrica utilizando banco de inductancias	74

3.3.4. Práctica 4: Efecto de la variación de la inercia del rodete de una Turbina
hidroeléctrica 75

Capítulo IV: Discusión de los Resultados	75
4. Conclusiones.....	77
5. Recomendaciones	79
6. Recursos.....	80
6.1. Recursos Humanos.....	80
6.2. Recursos Institucionales.....	80
6.3. Recursos Materiales y Económicos.....	81
7. Cronograma.....	82
8. Referencias bibliográficas.....	84
9. Anexos	97

Índice de figuras

Figura 1. <i>Diagrama simplificado de una Central Hidroeléctrica de embalse.</i>	32
Figura 2. <i>Embalse de 80 metros de altura de la Central Hidroeléctrica Minas de San Francisco.</i>	34
Figura 3. <i>Vista Aérea de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair.</i>	35
Figura 4. <i>Diagrama esquemático de una Central Hidroeléctrica de Bombeo.</i>	36
Figura 5. <i>Esquemas de Centrales hidroeléctricas: a) Central de pequeña altura. b) Central de mediana Altura. c) Central de Gran Altura.</i>	38
Figura 6. <i>Corte transversal de una Turbina Francis. a) Turbina Francis Radial. b) Turbina Francis Mixta o Semiaxial.</i>	43
Figura 7. <i>Corte en perspectiva de una turbina Francis exponiendo sus partes.</i>	44
Figura 8. <i>Esquema de una caja espiral para una turbina Francis</i>	45
Figura 9. <i>Distribuidor de Álabes Directrices. 1) Fondo inferior del Distribuidor. 2) Álabes Móviles. 3) Aro guía de distribuidor. 4) Bielas. 5) Palanca de Álabes Guías. 6) Palier Superior de los Álabes Directrices</i>	46
Figura 10. <i>Rotor de una Turbina Francis.</i>	47
Figura 11. <i>Tubería de Aspiración</i>	48
Figura 12. <i>Diagrama de un rotor de una turbina hidroeléctrica con triángulos de velocidades en la entrada y en la salida</i>	51
Figura 13. <i>Triángulo de velocidades. a) Entrada. b) Salida. c) Proyección meridional</i>	52
Figura 14. <i>Diagrama de un Rotor de una turbina con vectores posición y velocidad absoluta</i>	53
Figura 15. <i>El Dinamómetro/Fuente de alimentación 4 cuadrantes Modelo 8960-3</i> ..	59

Figura 16. <i>Interfaz Dinamómetro/Fuente De Alimentación Para Turbina Hidroeléctrica</i>	64
Figura 17. <i>Dinamómetro/fuente de Alimentación de Cuatro Cuadrantes Modelo 8960-F con la función de emulador de Turbina Hidráulica</i>	66
Figura 18. <i>Fuente de alimentación trifásica</i>	67
Figura 19. <i>Motor/Generador Síncrono de 4 polos</i>	68
Figura 20. <i>Módulo de cargas Resistivas</i>	69
Figura 21. <i>Módulo de Inductancia de carga</i>	70
Figura 22. <i>Multímetro Fluke – 87 v</i>	71
Figura 23. <i>Pinza Amperimétrica</i>	72
Figura 24. <i>Conductor con terminal tipo banana</i>	73

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Centrales Hidroeléctricas clasificadas Según su Potencia</i>	37
Tabla 2. <i>Clasificación de la Centrales Hidroeléctricas Según la Altura de su Salto</i> .38	
Tabla 3. <i>Clasificación de Turbinas Hidroeléctricas según su Salto, Caudal y Potencia</i>	41
Tabla 4. <i>Componentes de una Turbina hidroeléctrica Francis</i>	44
Tabla 5. <i>Tipos de turbina Francis en función de ns y altura</i>	58
Tabla 6. <i>Parámetros de función en la interfaz del módulo</i>	62
Tabla 7. <i>Especificaciones Técnicas del dinamómetro de cuatro cuadrantes</i>	64
Tabla 8. <i>Recursos Humanos</i>	80
Tabla 9. <i>Recursos Institucionales</i>	80
Tabla 10. <i>Recursos Materiales y Económicos</i>	81
Tabla 11. <i>Cronograma Etapa 1</i>	82
Tabla 12. <i>Cronograma Etapa 2</i>	83

Tabla de Abreviaturas.

Abreviatura	Significado
ARCERNNR	Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables
H	Altura de salto de agua
H_u	Altura útil aprovechada por el rotor
β	Ángulo resultante entre la velocidad absoluta y la velocidad relativa
α	Ángulo resultante entre la velocidad relativa y la velocidad relativa
A	Área Transversal
C/L	Capacitancia/Inductancia.
Po/P	Carga Natural/Potencia.
H_n	Carga neta de la columna de agua
Q	Caudal
\vec{v}_m	Componente meridional de la velocidad relativa del agua
\vec{v}_u	Componente periférica de la velocidad relativa del agua.
CA, CC	Corriente Alterna, Corriente Continua.
HVDC	Corriente Directa de Alto Voltaje.
I	Corriente.
ρ	Densidad del fluido
g	Gravedad
Zo/Z	Impedancia Característica/Impedancia.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transmisor/Transistor Bipolar con Estructura de Puerta Aislada.

LT	Línea de Transmisión.
MERNNR	Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables.
T	Momento dinámico rotacional de la Turbina
γ	Peso específico del agua
P_t	Potencia nominal de la Turbina
η_t	Rendimiento de la turbina
η_g	Rendimiento del generador
R	Resistencia.
N	Revoluciones de la turbina
n_s	Revoluciones específicas
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia
SNI	Sistema Nacional Interconectado.
E_E	Tensión Extremo Emisor.
E_R	Tensión Extremo Receptor.
\vec{r}	Vector posición
\vec{c}	Velocidad absoluta del agua.
v	Velocidad promedio del flujo
\vec{w}	Velocidad relativa del agua.
ω	Velocidad rotacional de la Turbina
\vec{u}	Velocidad tangencial del rotor.
VSC	Voltage Source Converters/ Convertidores de Fuente de Voltaje.
V/E	Voltaje/Tensión.

Introducción

Las instalaciones del laboratorio de la carrera de Ingeniería en Electricidad están equipadas con una variedad de instrumentos modernos que se han incorporado de manera planificada, permitiendo a los estudiantes desarrollar sus habilidades prácticas e investigativas, cumpliendo con los requisitos establecidos en el perfil de la carrera. Esto contribuye significativamente al crecimiento profesional de los alumnos. No obstante, dado el amplio alcance del área de estudio, surge la oportunidad de implementar un módulo de simulación de energías renovables. Este módulo permitirá realizar prácticas tanto bajo condiciones normales de operación como con datos personalizados, facilitando un análisis más profundo y generando conclusiones valiosas sobre el desempeño de los sistemas eléctricos en diferentes escenarios.

Las prácticas en un laboratorio constituyen una parte importante en la formación profesional ya que permiten corroborar los conocimientos teóricos impartidos en el aula (Aguilera, 2020). La falta de comprensión práctica de los temas conduce a un aprendizaje limitado a premisas teóricas, sin oportunidad de validarlas, es por esto por lo que, el laboratorio se convierte en un aula de clases muy importante, en donde, se podrá observar con detalle los fenómenos físicos asociados a la electricidad entendiendo la fundamentación teórica, por ende, la carencia de los equipos necesarios es un problema que afecta directamente a la formación de los estudiantes (Wise, 2020).

La adquisición de equipos que simulan la operación y comportamientos de generación con fuentes renovables es fundamental para la formación práctica de profesionales, ya que, la importancia de la penetración de energías alternativas en la matriz eléctrica permite frenar el cambio climático y tener una mayor eficiencia energética (PABLO, 2024). El uso de los combustibles fósiles genera un alto impacto ambiental cuya dependencia radica tanto en su fácil acceso como a los bajos costos de extracción, una de las formas óptimas de disminuir los gases de efecto invernadero generados por la utilización de los combustibles fósiles fueron los

objetivos establecidos en el acuerdo de París de 2015. Que es el primer acuerdo de carácter energético (Roca Jusmet, 2022).

En este último se establecía como objetivo principal alcanzar un límite de aumento de 1,5°C de la temperatura media global disminuyendo las emisiones de dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y de gases fluorados a la atmosfera frenando las consecuencias del cambio climático (Ramírez Bañuelos, 2022). Optar por el uso de energías renovables también es un factor que contribuye a este propósito, además de ayudar al crecimiento económico mediante el aprovechamiento de recursos propios de cada entorno para no solo generar energía, si no una mejor calidad de vida.

El desarrollo económico de un país se da a la par del desarrollo energético, por lo tanto, para que un país pueda crecer, debe existir una política energética estable y en continuo crecimiento, el estado ecuatoriano de forma histórica logró mantener esta premisa principalmente mediante el uso de combustibles fósiles para la generación de electricidad (Morán et al., 2019). No obstante, este tipo de tecnología no podía abastecer la demanda que constantemente estaba en crecimiento, por ende, la implementación de nuevas formas de generación eléctrica aprovechando los recursos propios fue necesario para asegurar el desarrollo óptimo tanto de la matriz energética del país como el desarrollo económico y social (Mantilla Rodríguez, 2020).

La topografía, así como la climatología y sobre todo la riqueza hidrográfica del país permitieron ampliar las formas de generación existentes hasta ese momento, una de las opciones fueron las hidroeléctricas cuyo principio fundamental es la conversión óptima de la energía cinética de un cuerpo de agua a una determinada altura en energía eléctrica (Álvarez González, 2022). El proceso de conversión se logra con una turbina hidráulica compuesta de álabes, que permiten la rotación de la misma que se dará por el caudal del agua, este método de generación ha existido mucho tiempo, pero se ha ido perfeccionando la tecnología implicada

para mejorar resultados en la conversión, es decir, hoy las turbinas son más eficientes para transformar energía (Comas i Segura, 2022).

El aprovechamiento de los cuerpos de agua como una forma de generar electricidad es un recurso que se ha utilizado en el país desde el inicio del desarrollo de la matriz eléctrica, ya que, en 1897 la empresa Luz y Fuerza dispuso de dos turbinas de 12 kW cada una, instaladas en el río Malacatos en la ciudad de Loja (Rea Tenelema, 2024). Para la década de 1940 hasta el año 1961 se inició con la instalación de pequeñas centrales hidroeléctricas y, al término del periodo, se contaba con una potencia instalada de 120 MW, cifra que es ínfimamente pequeña en comparación con la envergadura de proyectos hidroeléctricos que satisfacen la demanda actual del Ecuador (Olmedo Falconí, 2023).

Actualmente en Ecuador, la predominancia de tecnología en la matriz eléctrica es la hidroelectricidad, ya que, en situaciones climatológicas normales alrededor del 80% de la demanda total es cubierta por este tipo de generación, evidenciando el aprovechamiento de las energías renovables disponibles dentro del territorio. Hasta julio del 2024 el 83% de la energía total del país fue producida por la hidroelectricidad (Briones Soto & Orbe Játiva, 2024). Por otro lado, existen periodos de estiaje dentro del país, en los que la generación hidroeléctrica se ve afectada debido a la reducción de los caudales, ya que, al contar con más centrales de paso que de embalse, el no tener un flujo de cuerpo de agua continuo trae consecuencias directas en la capacidad de generación (Naranjo-Silva, 2024).

Una insuficiencia en la capacidad del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) de suplir la demanda total del país se convierte en una crisis energética, situación que atraviesa Ecuador por los factores climatológicos mencionados (estiaje de septiembre a marzo de cada año), y por la falta de inversión en nuevos proyectos hidroeléctricos, por lo que se deben realizar razonamientos eléctricos para garantizar la estabilidad del sistema eléctrico del territorio (Guerrero Cañar, 2024). Este tipo de problemas se agrava cuando se destaca que la capacidad

principal de generación está en proyectos hidroeléctricos grandes, como Coda Codo Sinclair en la provincia de Napo que en situaciones normales de operaciones aporta alrededor del 30% de la producción energética del País con una potencia instalada de 1500 MW y que junto con el proyecto hidroeléctrico paute integrado regulan la frecuencia primaria del sistema (Naranjo-Silva et al., 2022).

Otros proyectos hidroeléctricos que componen la mayor parte de matriz energética del Ecuador son: Central Molino 1075 MW, Central Sopladora 487 MW, Central Minas de San Francisco 270 MW, en la provincia de Azuay. En la provincia de Tungurahua tenemos a la Central San Francisco 230 MW. La capacidad descrita hace énfasis a la capacidad instalada de cada una de las centrales (Ministerio de Energía y Minas, 2024). La generación por hidroelectricidad al abarcar la mayoría del sector eléctrico se vuelve un tipo de energía renovable fundamental de estudio, por lo tanto, al no contar con un módulo dedicado, crea falencias que se centran en el funcionamiento y variación de los parámetros característicos de centrales y cómo se comportan frente a situaciones reales en el campo de acción (Pereira, 2021).

Como se describió con anterioridad, para el caso de las centrales hidroeléctricas la energía mecánica se obtiene mediante el flujo de un cuerpo de agua que incide en los álabes de una turbina, que se encarga de recibir toda la energía potencial y cinética obtenida en ese proceso (Ricondo Rodríguez, 2023). A su vez, la turbina debe estar acoplada a un generador síncrono mediante su eje, para completar el proceso de transformación de la energía mecánica a energía eléctrica. Entender por completo cómo funciona una central hidroeléctrica es relevante, por ello es necesario enmarcar el principio de funcionamiento básico de este tipo de máquinas eléctricas (Ponce, 2017).

Su principio básico de operación de las máquinas electromecánicas se basa en los campos magnéticos, de forma que el rotor gira generando un campo magnético variable, el giro

es producido por la turbina acoplada mecánicamente a su eje (Tipler & Mosca, 2021). Mediante la ley de Faraday la variación campo magnético producido puede inducir una corriente en las bobinas del estator. La velocidad de giro para el caso del generador síncrono se mantiene en un valor fijo, esta velocidad de giro del rotor va a determinar la frecuencia de la corriente alterna que se generó, a esta característica se la denomina velocidad de sincronismo o velocidad síncrona (Paola et al., 2019).

Permitir la sincronización de la máquina con la red es una de las características fundamentales del SEP, además del control del voltaje, magnitudes que son esenciales para mantener la estabilidad y la calidad de la energía eléctrica en el estado normal de operación del SEP (Roller & Blum, 2020). De esta forma se evita periodos de inestabilidad o generando que el SEP, por alguna perturbación, pase a un estado de emergencia. Dentro de un SEP, se cuenta con varios generadores síncronos los cuales deben funcionar en sincronía o dentro de la banda admisibles de funcionamiento para cada uno de sus parámetros, los cuales son: voltaje, frecuencia o ángulo (Gu et al., 2022).

La máquina síncrona presenta características destacables como lo son una alta eficiencia cuando está conectada a la red en sincronía o la existente posibilidad de controlar la potencia reactiva mediante la corriente de excitación variando en la entrega de reactivos según sea la necesidad del estado de operación del SEP. Además, por su robustez puede mantener los parámetros de frecuencia y el voltaje relativamente estables (Cherta, 2022). La principal desventaja es el requerimiento de un sistema de control preciso para poder sincronizarse con la red, por ende, conlleva a un complejo sistema de regulación de la excitación que éste, a su vez, realiza la variación de otros parámetros fundamentales (Sandeep & Murthy, 2021).

En un generador síncrono, para valores bajos de corriente de excitación, la tensión generada aumenta, proporcionalmente, a dicha corriente. Sin embargo, una vez se ha superado cierto valor de excitación, el núcleo magnético se satura y, por tanto, la tensión generada

prácticamente no aumenta (Castillo, 2021). Conociendo esto podemos plantearnos situaciones de operación dentro del SEP como perturbaciones, transitorias o temporales que contribuyan a posibles eventualidades anormales en el sistema que engloba la generación eléctrica. Estos escenarios de la operación se llegan a plantear en el simulador de Turbina hidroeléctrica (Dale R. Patrick et al., 2021).

La falta de la herramienta módulo dinamómetro de 4 cuadrantes que nos permita simular los parámetros de una turbina hidroeléctrica crea una necesidad que debe ser solucionada, siendo fundamentalmente de interés para la carrera de ingeniería en electricidad no solo para la actualidad, si no para las futuras implementaciones que se hagan dentro del rubro (Guyer, 2023). El uso de fuentes de energía renovables como la hidroeléctrica facilita la disminución del uso de combustible fósiles, siendo una herramienta imprescindible para frenar el cambio climático (Hernández, 2022).

En las simulaciones que se plantean desarrollar, se contempla la aplicación de los cálculos asociados al funcionamiento real de una turbina hidroeléctrica, para que se aproxime lo más posible en los resultados, trazando curvas características de operación. Partiendo de los conocimientos teóricos obtenidos y la revisión bibliográfica realizada se logrará determinar que los parámetros de interés descritos dentro de las prácticas se relacionan con fidelidad a los datos registrados y observados en los escenarios de operación del SEP que serán planteados en función de los objetivos planificados y posteriormente alcanzados con la ejecución de la simulación en el laboratorio de potencia.

El módulo dinamómetro de cuatro cuadrantes con su firmware de turbina hidroeléctrica permitirá comprobar que el nivel de aportación que tienen las prácticas para validar los fundamentos teóricos obtenidos en el aula de clases mediante la simulación y estudio de generación síncrona en pequeñas y grandes instalaciones hidráulicas, variando la velocidad, ángulo e inercia del rodete de la turbina (Rojas Rueda & Mojica Perez, 2023).

Por otro lado, la parte práctica o simulación en la actualidad cumple un rol importante que permite comprender el funcionamiento de los sistemas de forma general, ya que el comportamiento de éstos no será el mismo ya que depende de las condiciones establecidas al mismo tiempo de las características técnicas (Breen, 2021). Delimitando el problema al laboratorio, ya que el análisis se centrará en la simulación de diferentes parámetros de funcionamiento para obtener curvas relacionadas con la generación según los factores implícitos al usar los cuerpos de agua como forma de generación.

El presente documento está conformado por 4 capítulos lo cuales se describen a continuación:

El capítulo 1 comprende el planteamiento y delimitación del problema, se detallan los antecedentes que enmarca tanto la importancia, así como el crecimiento de las energías renovables en la matriz energética del Ecuador, donde la energía hidroeléctrica representa el porcentaje mayoritario, se plantea la justificación para implementar el módulo dinamómetro de cuatro cuadrantes con función de simulación de turbina hidroeléctrica el cual permite tener un acercamiento a la operación de la tecnología predominante en el país, afianzando los conocimientos teóricos obtenidos en la formación profesional.

Se describe la propuesta donde se detalla la información de la implementación y los medios por los que se podrá hacerlo. También se detalló el problema de la investigación donde se establece que para el laboratorio de electricidad no hay un módulo donde se pueda simular una turbina hidroeléctrica variando sus parámetros según escenarios de operación. Como otros lineamientos se describe el objeto de la investigación, el campo de acción, la hipótesis, y los objetivos generales y específicos con los que se implementará el módulo de forma satisfactoria.

En el capítulo 2 se hace énfasis a la fundamentación teórica, donde se plantean todos los modelos, conceptos y criterios que estén asociados a la energía hidroeléctrica, así teniendo

la información necesaria para interpretar los posibles resultados que se pretenden obtener. Dentro de este capítulo también se amplían la visión de la hidroelectricidad, los tipos de centrales dependiendo su capacidad de generación, los diferentes tipos de turbinas que existen, detallando el comportamiento de la turbina tipo Francis y su aplicación para la generación de electricidad.

Para la descripción del diseño del proyecto se estableció el capítulo 3, que comprende la metodología a utilizar, siendo de tipo mixta, ya que, tendrá componentes de metodología cualitativa y cuantitativa, en este capítulo se describe el módulo a implementar, sus características técnicas, así como, las funcionalidades de este. Además del apartado de la selección de instrumentos y equipos, que complementarán el uso del módulo enriqueciendo los resultados que podemos obtener mediante las prácticas, cuya información como objetivos, descripción, procedimientos, se detallarán en este capítulo.

En el capítulo 4, los objetivos descritos antes se concluyen con las prácticas realizadas, usando la fundamentación teórica planteada. Otro componente del capítulo son los recursos utilizados como: humanos, institucionales, materiales y económicos. El cronograma también es detallado para comprender la organización del desarrollo del presente documento, las referencias bibliográficas utilizadas que respaldan los argumentos obtenidos, finalizando este capítulo se incorporan los anexos los cuales contienen las prácticas realizadas en un formato específico.

Para finalizar se concluye que mediante la implementación de un dinamómetro de cuatro cuadrantes en el laboratorio de electricidad para la simulación de varios parámetros en las condiciones operativas de una turbina hidroeléctrica se obtendrá diversas conclusiones sobre el comportamiento bajo las condiciones específicas. De forma que el objetivo general para cumplir dicho planteamiento es:

Desarrollar simulación de turbina hidroeléctrica mediante la implementación del dinamómetro de cuatro cuadrantes en laboratorio de electricidad para el análisis de parámetros obtenidos bajo diversas condiciones de funcionamiento.

Para lograr el objetivo se deben cumplir con puntos fundamentales, de forma que el desarrollo tenga coherencia e importancia requerida, los cuales se detallan a continuación:

- Designar los parámetros iniciales de funcionamiento del dinamómetro de cuatro cuadrantes para determinar las condiciones de operación de una turbina hidroeléctrica.
- Comparar los resultados obtenidos con otras simulaciones con parámetros distintos de inercia, ángulo del álabe complementado con el estudio de la curva par-velocidad.
- Conceptualizar el comportamiento de los cambios bajo fundamentación teórica estableciendo conclusiones para cada simulación con parámetros distintos.

1. Capítulo I: El Problema

1.1. Antecedentes

La generación hidroeléctrica en la actualidad es una de las formas más utilizadas en el globo para el desempeño de las actividades básicas del mundo moderno, utilizada en una alta gama de aplicaciones debido a ser una energía limpia y eficiente, siendo producida a partir de fuentes de energía renovables contribuyendo a la reducción de la contaminación ambiental (Seippel, 2021).

En Ecuador, al ser un país emergente con una economía dolarizada, el petróleo representa cerca del 35% de las exportaciones y la economía nacional utiliza combustibles fósiles subsidiados, estos son unos de los principales motivos para que el reemplazo de hidrocarburos como energético preferido sea complicado, pues, la transición energética diversificada es difícil y de muy largo plazo (Guerra, 2021).

De acuerdo, con (Ministerio de Energía y Minas, 2023), para junio del 2023 el porcentaje de generación de energía según su categoría en Ecuador se encuentra dispuesto de la siguiente forma: 73.8% energía hidroeléctrica, eólica 0.97%, biogás 0.37%, fotovoltaica 0.13% y biomasa 0.12%, del total de las formas de generación la que tiene predominancia es la hidroeléctrica por ende su vital importancia de estudio.

No obstante, proyectos innovadores que toman como protagonista a las generadoras hidroeléctricas para desarrollar nuevos insumos energéticos de vanguardia, según lo argumenta (Vásquez, 2023), se plantean diversas alternativas para la producción de Hidrógeno como reemplazo al uso de combustibles fósiles, tomadas de la mano de la fuente de energías renovables de tipo Hidroeléctrico.

La importancia del uso de las energías renovables para la generación de energía eléctrica es necesaria para el avance de la sociedad no solo en temas energéticos, si no para el ambiente ya que otras formas de generación como las centrales térmicas afectan negativamente

al medio donde vivimos. Estos crecen rápidamente por la poca contaminación que producen, no se agotan y por el mínimo costo de operación que tiene, estos factores acompañados de cogeneración tienden a potenciarse ya que se aprovechan las características de ambas formas de generación utilizadas (Jaeseok Choi & Kwang Y. Lee, 2022).

1.2. Justificación

La necesidad de un equipo que permita prácticas sobre un tema predominante en la actualidad como lo son las energías renovables, aún más para el caso de las hidroeléctricas que son el principal método de generación dentro del territorio nacional, se convierte en un factor decisivo para la formación de profesionales y el desarrollo de sus habilidades tanto comprensivas como técnicas de aplicación. Por el motivo planteado, este trabajo pretende simular una turbina hidroeléctrica implementando dinamómetros de cuatro cuadrantes en el laboratorio de electricidad.

Por lo tanto, beneficiaria beneficiará a los estudiantes de la carrera de ingeniería en electricidad en comprobar y reforzar los conocimientos obtenidos en clase, además de hacer uso del firmware especializado para la simulación de la turbina hidroeléctrica, variando sus parámetros de ángulo, velocidad o la inercia relacionada a las características constructivas de la misma, ya que será posible simular centrales de pequeña o gran escala, de esta forma el alumnado puede acercarse a la realidad energética del país en donde se tienen grandes y pequeños parques de generación de energía eléctrica.

En definitiva, el aporte que la implementación del módulo es un factor influyente para comprobar las bases teóricas aprendidas y los alumnos puedan sacar sus conclusiones enriqueciendo los conocimientos ya adquiridos generando dudas o interés con un alto valor educativo, satisfaciendo el componente práctico necesario en muchas materias dentro de la malla curricular de la carrera.

1.3. Propuesta

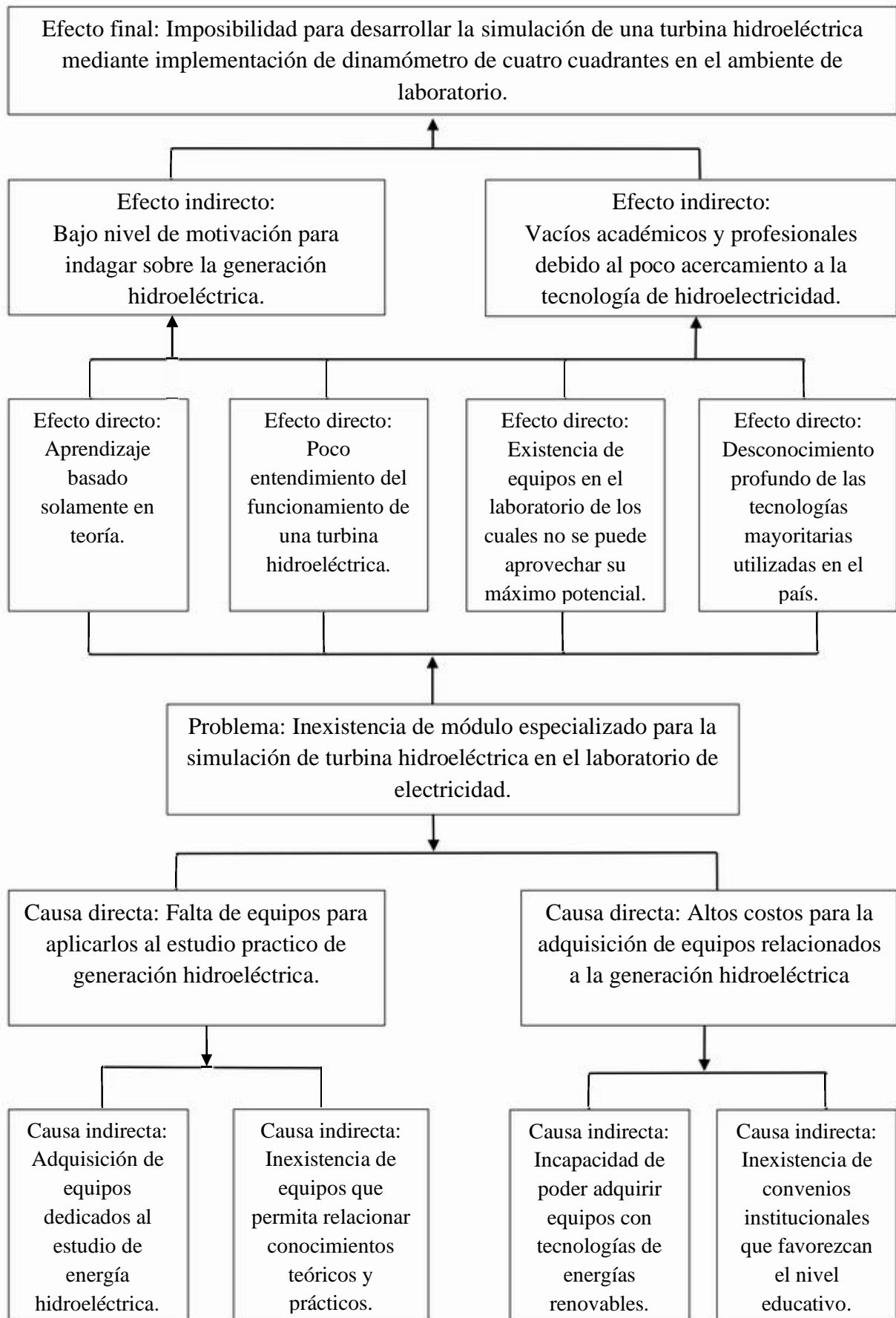
Con este trabajo de titulación realizado bajo la modalidad de proyecto técnico se pretende presentar una recopilación de prácticas en las que se plasme la simulación de, parámetros de interés en la generación hidroeléctrica mediante el módulo Dinamómetro/Fuente de alimentación 4 cuadrantes Modelo 8960-3, que se detallarán en relación con los pasos, procesos y resultados obtenidos. Implementando el módulo mencionado se cuenta con material didáctico fundamental para aplicar los conceptos teóricos académicos y responder preguntas de comprobación en diferentes escenarios de estudio.

1.4. Problema de Investigación

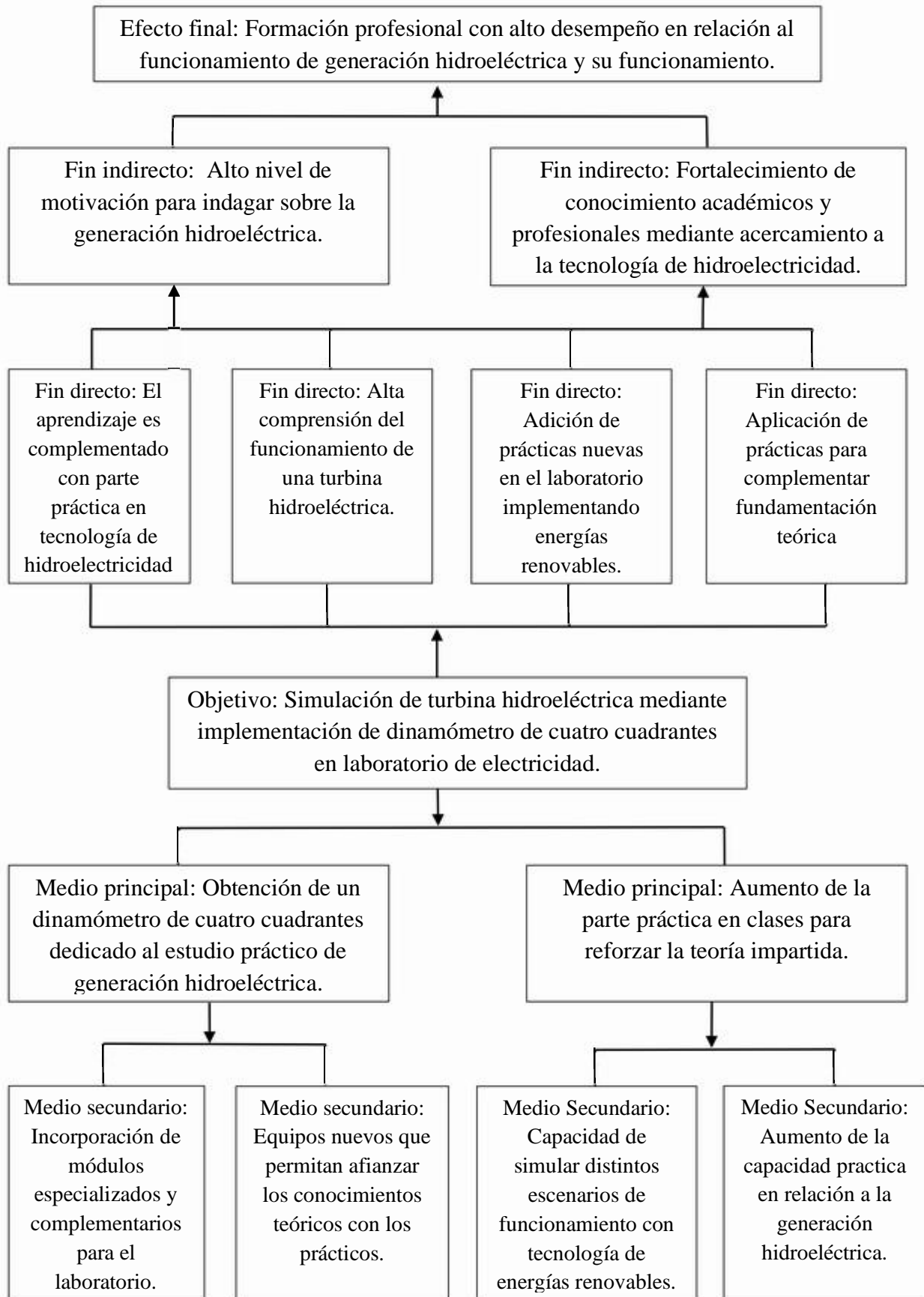
En el caso específico del laboratorio de electricidad; “No cuenta con un módulo especializado donde se pueda simular una turbina hidroeléctrica, complicando satisfacer las preguntas de comprobación que surgen después de que la parte de teórica es impartida, además de ser fundamental debido al incremento progresivo del uso de energías renovables no solo en el país, ya que es una tendencia mundial.” Además, para el Ecuador, el estudio de esta tecnología es fundamental que es la principal fuente de generación de energía.

Delimitando el problema al laboratorio, ya que el análisis se centrará en la simulación de diferentes parámetros de funcionamiento para obtener curvas relacionadas con la generación según los factores implícitos al usar los cuerpos de agua como forma de generación.

1.5. Árbol de Problemas



1.6. Árbol de Objetivos



1.7. Objeto de la Investigación

Realización de prácticas con el módulo Dinamómetro/Fuente de alimentación 4 cuadrantes Modelo 8960-3 para comprender analizando resultados sobre conceptos fundamentales sobre el funcionamiento de turbinas hidroeléctricas en la etapa de generación de energía eléctrica.

1.8. Campo de Acción

Laboratorio de Potencia de la carrera de Electricidad de la Facultad de Ingeniería, Industria y Construcción de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

1.9. Hipótesis

Implementando el módulo de cuatro cuadrantes en el laboratorio de potencia de la facultad de ingeniería se comprobará la simulación de una central hidroeléctrica bajo diferentes escenarios de interés.

1.10. Objetivos

1.10.1. *Objetivo General*

Simulación de turbina hidroeléctrica mediante implementación de dinamómetro de cuatro cuadrantes en laboratorio de electricidad.

1.10.2. *Objetivos Específicos*

- Designar los parámetros iniciales de funcionamiento del dinamómetro de cuatro cuadrantes para determinar las condiciones de operación de una turbina hidroeléctrica.
- Comparar los resultados obtenidos con otras simulaciones con parámetros distintos de inercia, ángulo del álabe complementado con el estudio de la curva par-velocidad.
- Conceptualizar el comportamiento de los cambios bajo fundamentación teórica estableciendo conclusiones para cada simulación con parámetros distintos.

1.11. Variables

- Independientes: Implementación de dinamómetro de cuatro cuadrantes.

- Dependiente: Simulación de turbina hidroeléctrica.

1.11.1. Tareas de Investigación

- Tarea 1: Investigación de los temas relacionados a la producción de energía hidroeléctrica.
- Tarea 2: Planificación y diseño de prácticas en el módulo Dinamómetro/Fuente de alimentación 4 cuadrantes Modelo 8960-3 con la función de simulación de turbina hidroeléctrica.
- Tarea 3: Desarrollo de las prácticas y recopilación de datos sobre los parámetros eléctricos de interés de la turbina hidroeléctrica.
- Tarea 4: Evaluación e interpretación de los datos obtenidos.
- Tarea 5: Apreciaciones de las diferentes configuraciones realizadas en el módulo Dinamómetro/Fuente de alimentación 4 cuadrantes Modelo 8960-3 para la simulación de turbina hidroeléctrica para diversos escenarios de operación según la variación de sus parámetros.
- Tarea 6: Conclusiones de cada escenario de operación de la turbina hidroeléctrica en función de la inercia del rodete, apertura de los álabes de la turbina, perfiles de cargas resistivas e inductivas y respuesta de la turbina ante perturbaciones.
- Tarea 7: Desarrollo del manual de prácticas relacionado a la simulación de la turbina hidroeléctrica con instrucciones y recomendaciones detalladas para la ejecución de las prácticas en el laboratorio.
- Tarea 8: Revisión de avances por el tutor de tesis.
- Tarea 9: Modificación de tesis con las observaciones realizadas.
- Tarea 10: Presentación y sustentación de tesis.

Capítulo II: Marco Teórico

2. Hidroelectricidad

El calor del sol es irradiado hacia la tierra y evapora grandes cantidades de agua por toda la superficie terrestre, luego, es redistribuida por la atmosfera, al descender la temperatura se condensa en forma de agua de lluvia, cayendo sobre los cuerpos de agua en territorio continental y descendiendo a mares y océanos para completar el ciclo hidrológico del agua (P. Martín & Ángel, 2023). La obtención de trabajo útil de la energía hidráulica se puede realizar en los ríos, en un punto determinado se puede crear un afluente artificial en la cual se pueda aprovechar dicha energía, por ejemplo, los romanos implementaron los primeros molinos hidráulicos para la molienda de granos usando ese método (Romero Hernández, 2022).

La hidroelectricidad es la generación de energía eléctrica mediante la energía mecánica producida por el movimiento del agua, el proceso se lleva a cabo con la utilización del flujo de agua a través de turbinas para realizar la transformación de energía cinética a energía eléctrica, de esta manera, se logra obtener una energía renovable y limpia (Bucio-Sistos et al., 2022). Este tipo de energía se obtiene con una serie de elementos e infraestructura como los son las turbinas hidroeléctricas y generadores síncronos. La combinación de estos elementos permite una integración fácil a la red eléctrica, permitiendo la entrega rápida de energía generada hacia las otras etapas funcionales del SEP (R.-M. Wang et al., 2021).

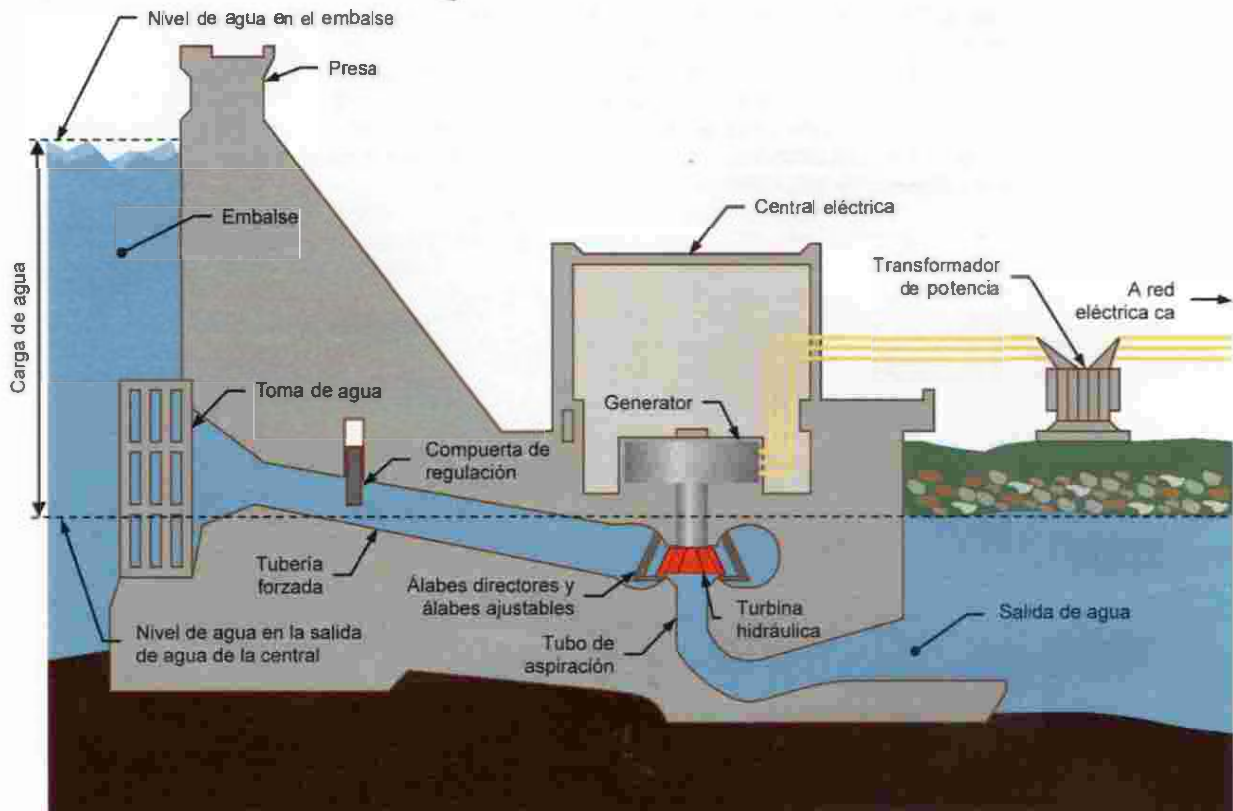
2.1. Centrales Hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas son instalaciones que aprovechan la energía cinética y potencial del agua para generar electricidad mediante la obtención de agua con un afluente artificial ubicado estratégicamente para aprovechar el desnivel natural de un río y obtener una combinación de energía cinética y potencial (Ji et al., 2023). Las hidroeléctricas se componen de varias partes estructurales diseñadas para aprovechar dicha energía del caudal del agua. De esta manera, se logra incidir el caudal en la turbina para realizar la conversión de energía

mecánica a energía eléctrica con la turbina acoplada mediante el eje del generador. Parte del proceso se puede apreciar en la Figura 1, *Diagrama simplificado de una Central Hidroeléctrica de embalse* (Vasilevskaya & Okhapkin, 2023).

Figura 1.

Diagrama simplificado de una Central Hidroeléctrica de embalse.



Adaptado de *Producción de Energía Hidroeléctrica* (p. 06), por Festo Didactic, Festo. (2023)

El proceso de la figura 1 se describe de la siguiente manera. El embalse almacena agua proveniente de algún afluente ya estudiado, en donde, ya se consideraron la variabilidad del caudal y disponibilidad del flujo hídrico en épocas de estiaje. Desde aquí, se controla el ingreso del agua con las compuertas o válvulas, el agua que ingresa lo hace mediante las tuberías forzadas (Quaranta et al., 2020). Estas tuberías están diseñadas con gran resistencia mecánica que puede soportar las variaciones de velocidad y presión del agua al ingresar a la sala de

máquinas. El salto de agua y velocidades de caudal se modificarán según el tipo de turbina y tipo de central hidroeléctrica (Sandoval Erazo, 2018a).

El agua es redirigida hacia la casa de máquinas en donde se encuentra el grupo Turbina – Generador y, mediante la tubería espiral, hace incidir el agua hacia la turbina para transmitir el movimiento al eje del generador. Dependiendo del tipo de turbina se necesitará una infraestructura dedicada a la turbina (Gómez Romero et al., 2020). En añadidura, el movimiento que se imprime en la turbina por incidencia del agua es transmitido por el eje hacia el generador, y la energía eléctrica generada se deriva a una subestación elevadora para transmitirla en alto voltaje. Todos los procesos descritos son supervisados por un sistema de control y monitoreo (Palomeque et al., 2020).

2.2. Clasificación de Centrales Hidroeléctricas

Se pueden definir varias clasificaciones de Centrales Hidroeléctricas en función de las características del terreno, flujo de agua y demanda de energía, entre otros. Definir la clase de central hidroeléctrica es de gran importancia porque permite orientar el diseño de esta en función del entorno donde se desee llevar a cabo el proyecto (A. M. Osorio & Cifuentes, 2020). De esta manera, se puede asegurar la eficiencia de la central, sostenibilidad ambiental y la demanda energética que se necesita para satisfacer al SEP. Las clasificaciones más reconocidas son: según la potencia, tipo de embalse, altura de salto, lugar de instalación (Ramirez, 2022).

2.2.1. Clasificación de Centrales Hidroeléctricas Según su Tipo de Embalse

2.2.1.1. Centrales Hidroeléctricas de Embalse

Son de las más comunes, permiten la regulación de caudal y de la producción de energía eléctrica, dada su naturaleza, su producción de energía no depende de las variaciones naturales del afluente seleccionado (Mendez, 2023). En la figura 2, *Embalse de 80 metros de altura de la Central Hidroeléctrica Minas de San Francisco*, se puede observar este tipo de centrales hidroeléctricas que son adecuadas para la generación de energía de manera constante y se puede

fácilmente adaptar a la fluctuación de demanda con la apertura de válvulas y agua almacenada, la infraestructura de embalse también contribuye al control de inundaciones y al abastecimiento para riego (Zegarra Macedo, 2020).

Figura 2.

Embalse de 80 metros de altura de la Central Hidroeléctrica Minas de San Francisco.



Tomado de *Celec Sur Inicia Mantenimiento del Embalse de la Central Minas de San Francisco*, Celec-EP, (2021).

2.2.1.2. Centrales Hidroeléctricas de Paso

Estas plantas no tienen un gran almacenamiento de agua y dependen directamente del flujo continuo del afluente seleccionado, como se observa en la figura 3, *Vista Aérea de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair*. En general, son menos invasivas en términos ambientales, esto, debido a la falta de embalse para el almacenamiento de agua (Núñez Villacís, 2021). La capacidad de producción de energía eléctrica de estas centrales hidroeléctricas depende de los periodos de alto y bajo estiaje durante el año, siendo así, ideales para áreas con

caudales de agua constantes. Su bajo costo de implementación y bajo riesgo ambiental lo hacen atractivo para su implementación, debido a que, son ideales para entornos de alta biodiversidad (Medina Chalan & Sigchi Quito, 2021).

Figura 3.

Vista Aérea de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair.



Tomado de *Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair*, Celec – EP (2023).

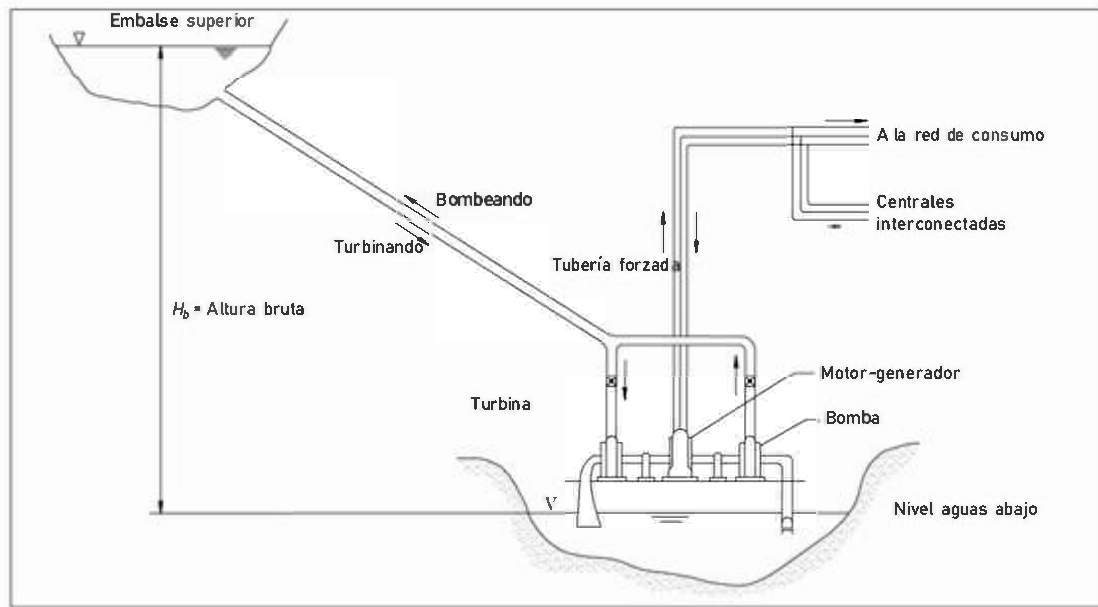
2.2.1.3. Centrales hidroeléctricas de Bombeo

La idea principal de funcionamiento de este tipo de central es la de bombear agua hacia un embalse superior en momentos de baja demanda eléctrica, para ello tienen diferentes métodos para la ejecución de la tarea, los más usados son los conjuntos reversibles de turbina, en donde, es posible utilizar el mismo conjunto turbina – generador para que funcione como un conjunto motor – turbina para la realización de la tarea (Leyton, 2023). Estas centrales tienen la característica de contar con dos embalses, uno superior e inferior, acumulando agua por

bombeo con la energía de baja demanda eléctrica y utilizando el agua almacenada para generar energía eléctrica en momentos con alta demanda eléctrica (Cayetano Gomez et al., 2022).

Figura 4.

Diagrama esquemático de una Central Hidroeléctrica de Bombeo.



Adaptado de *Tecnología Eléctrica* (p. 344), por Ramón Mujal, Edicions UPC (2003).

2.2.2. Clasificación de Centrales Hidroeléctricas Según su Potencia

La clasificación de centrales hidroeléctricas por su potencia se realiza en varios grupos, en minicentrales, pequeñas centrales, medianas centrales y grandes centrales, tal como se observa en la tabla 1, *Centrales Hidroeléctricas clasificadas Según su Potencia*. Fueron surgiendo según la necesidad de satisfacer la demanda energética de una zona en concreto, de esta manera, se iban implementando centrales de mayor tamaño según el crecimiento demográfico de un determinado territorio (Villalva Freire, 2021). La tendencia resultó ser en el inicio de pequeñas centrales que satisfacían poblados, luego, masivos bloques de potencia para satisfacer sectores energéticos demandantes, por último, se está optando por centrales grandes con unidades de generación de tamaño mediano para la óptima gestión de los recursos (Espejo Cerna, 2022).

Tabla 1*Centrales Hidroeléctricas clasificadas Según su Potencia*

Centrales Hidroeléctricas según Su Potencia	
Tipos	Potencia [kW]
Micro	< 99
Pequeña	100 a 999
Mediana	1000 a 9 999
Gran	> 10 000

2.2.3. Clasificación de Centrales Hidroeléctricas Según la Altura de Salto

Es una de las clasificaciones más importantes porque la altura neta es la que va a definir las demás características de la central, incluyendo estructuras como los embalses, afluentes de derivación, conductos forzados y, elementos de la central como lo es la propia turbina (N. Q. Martín & Infante, 2021). Existen 3 clasificaciones de salto que se pueden ver en la tabla 2, *Clasificación de la Centrales Hidroeléctricas Según la Altura de su Salto*, cada central cuenta con sus propias características, sin embargo, es bastante inexacto establecer una línea divisoria para cada altura de salto de agua. En la figura 5, *Esquemas de Centrales hidroeléctricas: a) Central de pequeña altura. b) Central de mediana Altura. c) Central de Gran Altura*, se puede observar una central con un salto de agua de pequeña altura en comparación con una central con altura media y gran altura (Pienika, 2022).

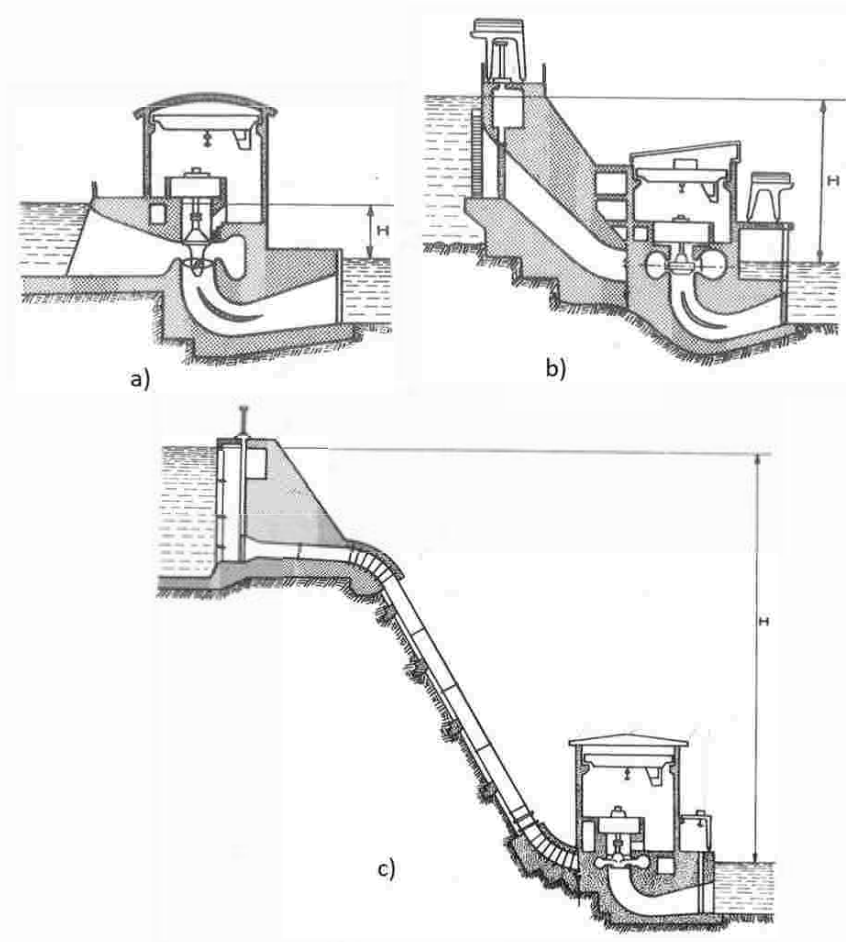
Tabla 2.

Clasificación de la Centrales Hidroeléctricas Según la Altura de su Salto.

Centrales Hidroeléctricas según la altura de su salto	
Altura de Salto	Altura H [m]
Pequeña	$H < 14.99$
Mediana	$15.00 < H < 49.99$
Gran	$H > 50.00$

Figura 5.

Esquemas de Centrales hidroeléctricas: a) Central de pequeña altura. b) Central de mediana Altura. c) Central de Gran Altura.



Adaptado de *Tecnología Eléctrica* (p. 356), por Ramón Mujal, Edicions UPC (2003).

2.3. Turbinas hidroeléctricas

En los sistemas de energía hidroeléctrica se aprovecha la energía que almacena el agua, ya sea por, su velocidad o altura. De esta manera, luego de que sea retenida en un embalse, se cuenta con un enrejado de hierro para filtrar el agua antes de proceder a circular por la tubería forzada hacia la casa de máquinas, en donde, el agua impacta a la turbina según sea el requerimiento (Ponzoni et al., 2022). La turbina gira unida con un eje al rotor del generador eléctrico, así que el generador convierte la energía mecánica de la turbina en energía eléctrica y se adecua para suministrarse a la demanda (Raj Shah & Stanley Zhang, 2021).

Las centrales hidroeléctricas tienen ventaja en comparación con sus contrapartes térmicas no renovables, las turbinas hidroeléctricas alcanzan rendimientos del 90 % por evitar el uso de calor como insumo primario para obtener energía mecánica rotacional, ya que el movimiento rotacional del eje del conjunto turbina–generador se logra con la incidencia del agua en los álabes de la turbina (Meier, 2020). Aumentar el rendimiento en los procesos de conversión de energía es favorable para la optimización de recursos en tecnologías de energías renovables, ayuda a reducir las pérdidas energéticas y maximiza la generación eléctrica por unidad de generación (Uğurlu, 2022).

2.4. Principio de funcionamiento de turbinas hidroeléctricas

El sistema comienza en almacenar el insumo de alguna manera, ya sea por captación, un río o embalse, con esto, se puede retener y controlar el flujo de agua con la apertura o cierre de válvulas (Maquera Maquera, 2023). El agua se libera gradualmente en la tubería forzada que se conecta con la casa de máquinas donde está la turbina, en este proceso, es importante el control del caudal del agua para asegurar la integridad del mismo, debido a que, las variaciones de caudal producen cambios de presión interna en las secciones mencionadas, al considerar esto, todos los elementos de la tubería forzada, tubería espiral, álabes, turbina y tubería de

aspiración están sometidos a esfuerzos mecánicos debido a los cambios de presión (Delgado Mansilla, 2023).

Cuando el agua pasa por la tubería forzada a espiral, se cuenta con los álabes directrices y móviles. Los primeros, también llamados álabes directores, son paletas que se ubican en un distribuidor fijo que reorientan la dirección del agua para que posea un ángulo más adecuado (Fonseca, 2022). Los alabes móviles o ajustables son paletas ajustables que regulan la cantidad de agua que ingresa en la turbina en cualquier momento, contando con un rango de apertura de 5° a 35°, como apertura mínima y máxima, respectivamente. La regulación automática de la apertura de los álabes móviles es crucial para satisfacer las demandas dinámicas del SEP (Cajincho Ango, 2022).

Estableciendo el flujo de caudal adecuado para cada escenario de operación se logra mantener estable la rotación de la turbina acoplada al eje del generador. Una vez aprovechada el agua para mover la turbina, adopta el nombre de agua turbinada y ésta tiene que pasar hacia el tubo de aspiración (Muñoz Bolaño, 2024). Este se encuentra debajo de la turbina y es fundamental su evacuación debido a que el agua turbinada ya ha perdido gran parte de su energía y puede obstaculizar el flujo de agua, la tubería de aspiración está conectada a la salida de agua de la central hidroeléctrica que es la continuación del afluente utilizado para el aprovechamiento hidroeléctrico (Gonzales Pareja & Mejia Ramos, 2023).

Existen dos grandes grupos de turbinas hidroeléctricas, estos son: turbinas de acción y reacción. Las Turbinas de Acción utilizan un inyector que convierte la energía de presión del fluido a energía cinética a chorro que incide en cada uno de los álabes de la turbina, éstas se encuentran a presión atmosférica (Quijano Rodríguez et al., 2021). Las Turbinas de Reacción el agua entra a la turbina con una presión elevada y sale por el tubo de aspiración con una presión menor a la atmosférica. No existe inyector debido a que los distribuidores se encargan,

junto con los alabes móviles y directrices, de hacer incidir el agua en la turbina (Ricondo Rodríguez, 2023).

2.5. Tipos de turbinas para Centrales hidroeléctricas

Las turbinas hidroeléctricas están sometidas bajo las condiciones de funcionamiento de la central, entre ellas están: altura del salto de agua, caudal disponible y la potencia requerida. Para el diseño de la central se considera estos parámetros y determinan el tipo de turbina que se instalará en la central (Sandoval Erazo, 2018b). En la tabla 3, *Clasificación de Turbinas Hidroeléctricas según su Salto, Caudal y Potencia*, se observan las diferencias fundamentales en las condiciones de operación de los diferentes tipos de turbinas más usadas, cada una con su rango específico de funcionamiento para aprovechar el recurso hídrico para generar energía eléctrica (Reino Cardenas, 2022).

Tabla 3.

Clasificación de Turbinas Hidroeléctricas según su Salto, Caudal y Potencia.

Clasificación de Turbinas Hidroeléctricas Según su Salto, Caudal y Potencia			
Tipos	Pelton	Kaplan	Francis
Salto de Agua [m]	40 – 1700	2 – 70	2 – 500
Caudal [m ³]	0.1 – 5	0.5 – 100	0.1 - 40
Potencia [kW]	5000	5000	2000

2.5.1. Pelton

Las Turbinas Pelton fueron diseñadas por Lester Allan Pelton, su operación está centrada en la presión de agua impresa por los inyectores de la turbina, estas turbinas son de admisión parcial, por lo que, solo un conjunto de sus álabes está influenciado por el chorro tangencial de agua (Ceballos Zuluaga et al., 2023). Estas turbinas están clasificadas según el número de inyectores que se puedan instalar encontrándose en dos grandes grupos: Sencillas y múltiples. Las turbinas Pelton sencillas son aquellas que tiene un solo inyector, en cambio, las múltiples adquieren el nombre según el número de inyectores, siendo así, turbina de dos

inyectores una turbina doble; turbina de 3 inyectores, turbina triple, continuando respectivamente (Meza Aliaga, 2023).

2.5.2. Kaplan

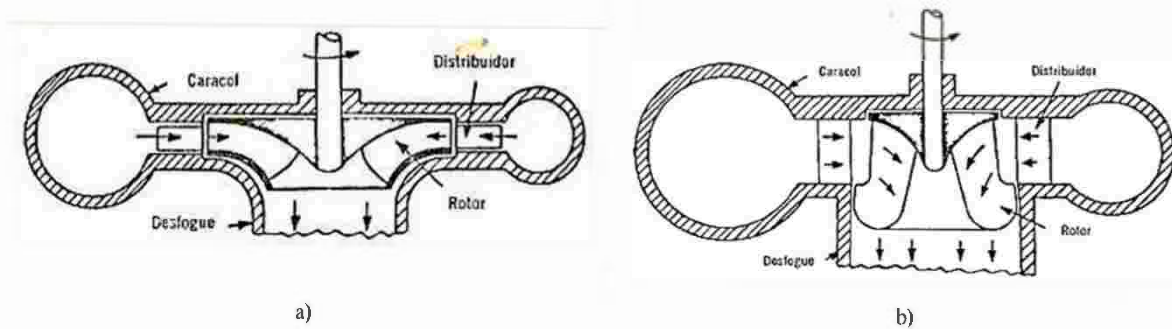
Las Turbinas Kaplan fueron diseñadas por Viktor Kaplan, el desarrollo de esta turbina es la evolución de la turbina Francis, en donde, se pueden regular el ángulo de admisión de los álabes de la turbina y la altura a la que el agua incide en la turbina mediante un vástago dentro de la tubería espiral (Combarro Marina, 2022). Los dispositivos que usa para modificar los ángulos de entrada de caudal permiten a la turbina disponer de un rango para aprovechamiento de energía más amplio que la Francis, sin embargo, también contribuye al elevado costo que tiene la turbina, decantándola para aplicaciones donde los saltos son cortos pero el caudal es variado (Peón Herrera, 2021).

2.5.3. Francis

Las turbinas Francis fueron diseñadas en el año 1848 por James Francis, estas turbinas son categorizadas por la manera en la que entra el flujo al rodete de la turbina dando como resultado turbina Francis de flujo radial y mixto, éste último es una combinación de flujo radial y axial (Reyna & Irazusta, 2020). El flujo axial es aquel en el que el flujo de caudal ingresa a la cámara espiral e incide paralelamente sobre la turbina, tomando como sistema de referencia el eje de rotación de la turbina, en cambio, el flujo radial es aquel que incide perpendicularmente sobre la turbina teniendo la misma referencia. La elección de estas categorías influirá sobre los diseños del rodete de la turbina Francis como se puede ver en la figura 6, *Corte transversal de una Turbina Francis. a) Turbina Francis Radial. b) Turbina Francis Mixta o Semiaxial* (Gómez Calderón & Moreno Galván, 2020).

Figura 6.

Corte transversal de una Turbina Francis. a) Turbina Francis Radial. b) Turbina Francis Mixta o Semi axial.



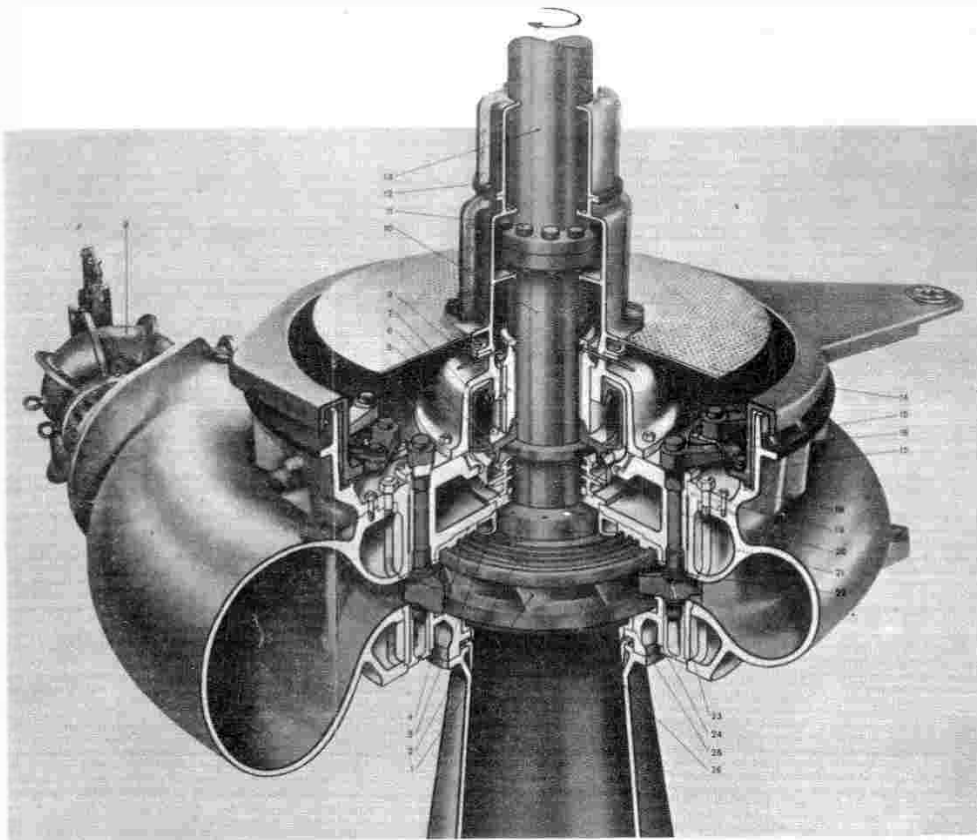
Adaptado de *Máquinas Hidráulicas* (p. 145), Urbano Sánchez Rodríguez, Editorial Club Universitario (2012).

2.5.4. Componentes de una turbina Francis

Una turbina Francis, al ser una turbina de reacción, consta de elementos que harán una inmersión total del rodete al fluido para el intercambio de la energía. Como se pudo observar en la tabla 3, *Clasificación de Turbinas Hidroeléctricas según su Salto, Caudal y Potencia*, está diseñada para trabajar en rangos intermedios de Caudal y altura de salto (Reyna & Irazusta, 2020). Una turbina Francis consta de varios componentes importantes para la conversión de la energía, dichos componentes se logran apreciar en la figura 7, *Corte en perspectiva de una turbina Francis exponiendo sus partes*. A su vez, se cuenta con la tabla 4, *Componentes de una Turbina hidroeléctrica Francis*, para su mayor comprensión. Se tratarán las partes más importantes a continuación.

Figura 7.

Corte en perspectiva de una turbina Francis exponiendo sus partes.



Tomado de *Máquinas Hidráulicas* (p. 157), Urbano Sánchez Rodríguez, Editorial Club Universitario (2012).

Tabla 4.

Componentes de una Turbina hidroeléctrica Francis

Partes de una Turbina Hidroeléctrica Francis	
1. Rodete	14. Podio de servicio
2. Anillo en laberinto giratorio	15. Palanca de álabes guías
3. Junta anular de Carbono	16. Bielas
4. Contra anillo en laberinto fijo	17. Aro de compuerta de distribuidor
5. Tubo Pilot	18. Anillo guía del aro de compuerta
6. Cuba de aceite	19. Tapa del distribuidor
7. Soporte de palier	20. Palier superior de los álabes guías
8. Palier de guía	21. Caja espiral
9. Orificio compensador o de descarga	22. Blindaje del distribuidor
10. Eje de turbina	23. Álabes guías
11. Pernos de acoplamiento	24. Palier inferior del distribuidor

12. Tubo de protección
13. Eje intermedio

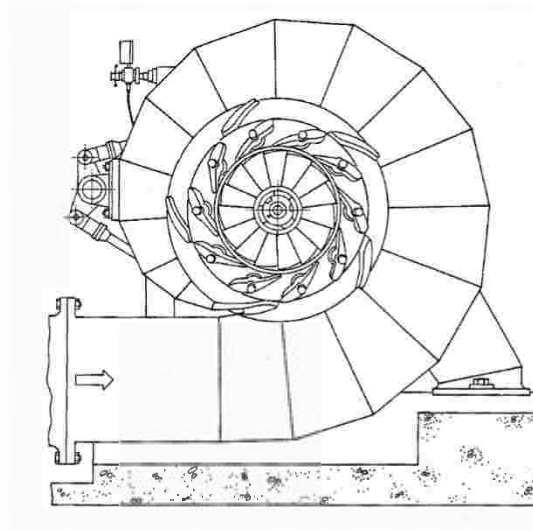
25. Fondo inferior del distribuidor
26. Tubo de aspiración

2.5.4.1. Caja espiral

Una caja espiral en una turbina Francis es una tubería en forma de espira que está diseñada para redirigir el flujo del caudal en dirección al rodete, junto con el distribuidor fijo y móvil mejoran el ángulo de “ataque” de la turbina para hacer el intercambio de energía (Delgado Mansilla, 2023). Además de la distribución uniforme del fluido y del control del fluido, la caja espiral también tiene la función de la reducción de turbulencias, dado que, su diseño es de diámetro decreciente que mantiene el sentido del flujo y permite tener un fluido laminar uniforme para el aprovechamiento óptimo de la energía. En la figura 8, se puede observar el *Esquema de una caja espiral para una turbina Francis* (Reyna & Irazusta, 2020).

Figura 8.

Esquema de una caja espiral para una turbina Francis.



Adaptado de *Revista energética* (p. 148), Zuley de Souza, OLADE (1986).

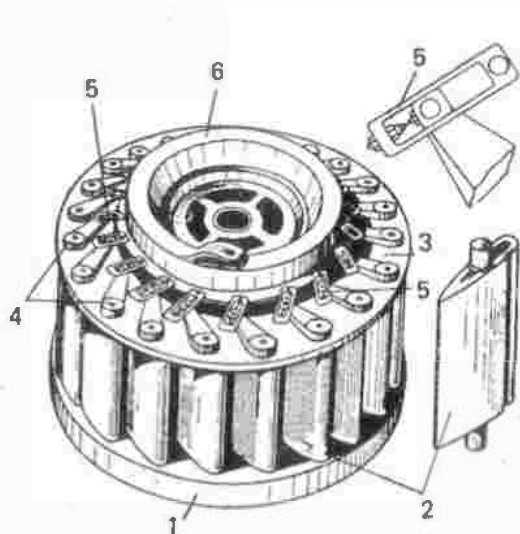
2.5.4.2. Distribuidor

El distribuidor consta de anillos que contienen álabes, estos pueden ser álabes móviles o fijos y según sea el caso, el distribuidor adquiere la denominación de directriz o fijo,

respectivamente. Un distribuidor fijo tiene los álabes de manera que reorienta la dirección del flujo y parcialmente convierte la energía de presión en energía cinética para la turbina (Fonseca, 2022). Un distribuidor directriz, como se observa en la figura 9, *Distribuidor de Álabes Directrices*, es aquel que puede rotar la posición de los álabes para que tenga mejor incidencia el fluido sobre el rodete de la turbina, consta de anillos móviles y un sistema de servomotores para permitir la apertura o cierre de los álabes. Este, a su vez regula el ingreso de caudal de acuerdo con la potencia pedida por el sistema (Villanueva & Ramirez, 2021).

Figura 9.

Distribuidor de Álabes Directrices. 1) Fondo inferior del Distribuidor. 2) Álabes Móviles. 3) Aro guía de distribuidor. 4) Bielas. 5) Palanca de Álabes Guías. 6) Palier Superior de los Álabes Directrices.



Adaptado de *Máquinas Hidráulicas* (p. 250), Urbano Sánchez Rodríguez, Editorial Club Universitario (2012).

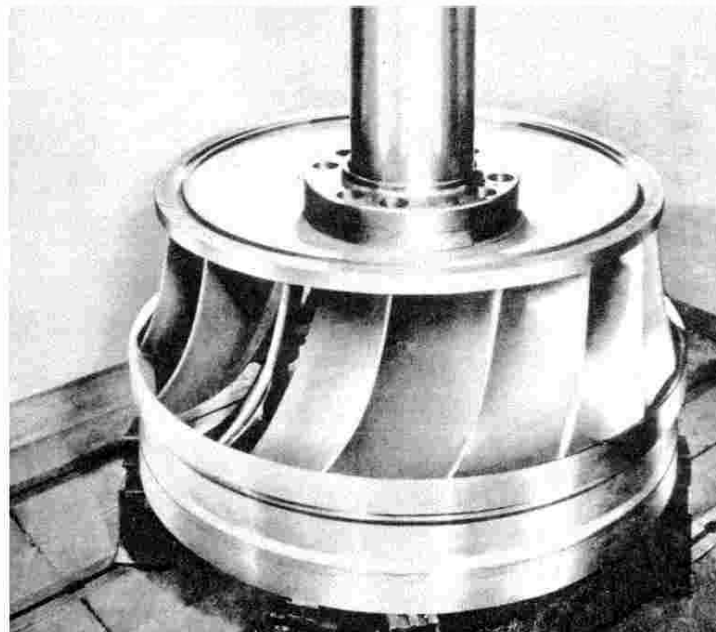
2.5.4.3. Rodete

El rodete o rotor de una turbina hidroeléctrica es el elemento que va a permitir realizar el intercambio de la energía potencial y cinética en energía mecánica, en la figura 6, *Corte*

transversal de una Turbina Francis, se puede observar el diagrama transversal de un rodete para la turbina tipo Francis y, dependiendo del tipo de flujo que entrará a la turbina y, en consecuencia, ésta adoptará una forma determinada (Gómez Calderón & Moreno Galván, 2020). Este tipo de rodete empieza con un álabe en forma radial y adopta poco a poco una forma axial en el mismo álabe, por lo que, la forma típica del rotor es abocardada. En la figura 10, *Rotor de una Turbina Francis*, se puede observar la forma característica de dichos rotores, en donde, la forma puede ser modificada según la velocidad de rotación (Guaylla Usca & Sinaluisa Topa, 2022).

Figura 10.

Rotor de una Turbina Francis.



Adaptado de *Máquinas Hidráulicas* (p. 256), Urbano Sánchez Rodríguez, Editorial Club Universitario (2012).

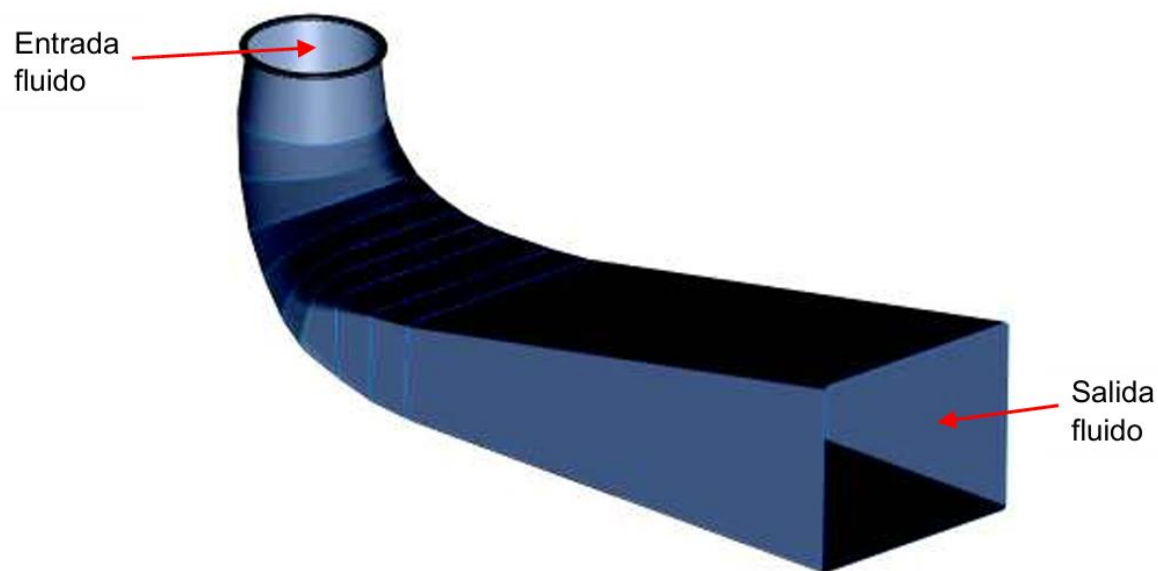
2.5.4.4. Tubería de Aspiración

A la caja espiral se le acopla a su salida una tubería para la salida del agua que ya intercambié su energía al rodete, a esta tubería se la conoce como tubería de aspiración o tubería de descarga. En ella se descarga toda el agua turbinada para depositarla en la continuación del

cuerpo de agua (Muñoz Bolaño, 2024). Estas estructuras tienen forma cónica suavizada, es decir, adquiere la típica forma de difusor y genera un efecto de aspiración para drenar el fluido, generalmente, estas tuberías forman ángulos de 90° para descargar en la cuenca inferior del afluente seleccionado, en la figura 11, *Tubería de Aspiración*, se puede observar el diagrama de una tubería de aspiración con su sentido de flujo de caudal (Álvarez Gómez, 2023).

Figura 11.

Tubería de Aspiración.



Tomado de *hidrología de pequeñas centrales Hidroeléctricas*, Gustavo Silva Medina, OLADE (2008).

2.6. Análisis turbina Francis

2.6.1. Ecuación de continuidad

Se expresa la conservación de la masa para movimientos de cuerpos fluidos como: “*La cantidad de masa que atraviesa la superficie de frontera del volumen en una unidad de tiempo, más, la rapidez de variación de la masa contenida en el volumen es igual a cero*” (Gilberto Sotelo, 2009). En ella se expresa que, el caudal Q que entra en una tubería cerrada de sección

A_1 con una velocidad v_1 , debe ser igual al caudal Q que pasará por la sección A_2 de la tubería con una velocidad v_2 , y se tiene entonces que:

$$Q = A_1 * v_1 = A_2 * v_2 = \dots = cte \quad (1)$$

En donde,

Q = Caudal [m^3/s].

A = Área [m^2].

v = velocidad promedio del flujo [m/s].

Lo que significa que el caudal volumétrico es constante para cada una de las secciones de una tubería cerrada sin deformaciones de la misma. Una turbina hidráulica es una turbomáquina que el fluido que intercambia energía no varía la densidad en el paso hacia la turbina, por lo que, la densidad del fluido a utilizar será constante. La pérdida de presión en el fluido producto de su intervención en la turbina, es la forma más habitual de pérdida de energía (C. V. P. Osorio, 2024).

y se tiene la siguiente consideración:

$$\rho = cte. \quad (2)$$

2.6.2. Triángulos de velocidades

El movimiento rotacional por unidad de tiempo ω provocado por el intercambio de energía entre el fluido y la turbina, abre paso al desarrollo de los triángulos de velocidades, los cuales, relacionan las componentes de entrada y salida de una partícula puntual. Dicha partícula adquiere valores de posición y velocidades, tanto en la entrada como en la salida de la turbina (C. V. P. Osorio, 2024). Los triángulos de velocidades se pueden desarrollar bajo las hipótesis de un régimen permanente, propiedades constantes en cualquier punto, flujo ideal y flujo unidimensional. Con estas hipótesis se permite un análisis vectorial para determinar los triángulos de velocidades, como se puede observar en la figura 12, *Diagrama de un rotor de*

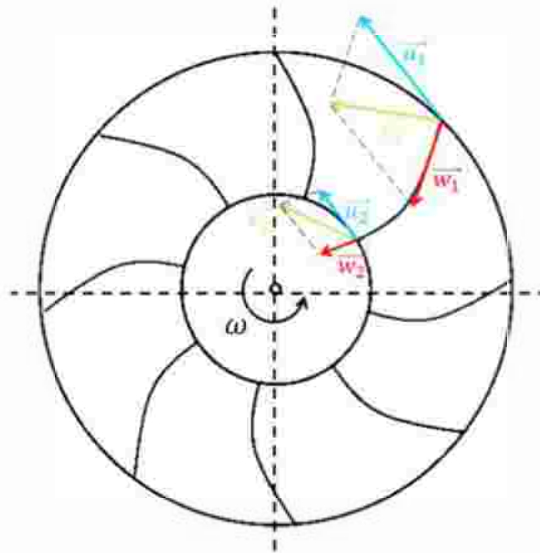
una turbina hidroeléctrica con triángulos de velocidades en la entrada y en la salida (Wilhem Rogger Limachi Viamonte, 2024).

Supóngase que un volumen controlado en el rodete V_r proporcionó la velocidad angular ω del mismo, el volumen controlado está formado por partículas de fluido ideal y, para el análisis, se tomará en cuenta una partícula puntal de fluido. Como se puede ver en la figura 12, *Diagrama de un rotor de una turbina hidroeléctrica con triángulos de velocidades en la entrada y en la salida*, la secuencia de sucesos describe que la entrada de la partícula comienza en el exterior del rodete y es expulsada a la salida del mismo en el interior del rodete, en este escenario, los puntos de entrada y salidas quedan definidos por la siguiente nomenclatura (Alvarez, 2024):

- El subíndice 1 se refiere a la entrada del fluido.
- El subíndice 2 se refiere a la salida del fluido.
- \vec{u} es la velocidad tangencial del rotor.
- \vec{c} es la velocidad absoluta del agua.
- \vec{w} es la velocidad relativa del agua.
- \vec{v}_m es la componente meridional de la velocidad relativa del agua.
- \vec{v}_u es la componente periférica de la velocidad relativa del agua.
- β es el ángulo formado entre la velocidad absoluta y la velocidad relativa.
- α es el ángulo formado entre la velocidad absoluta y la velocidad relativa.

Figura 12.

Diagrama de un rotor de una turbina hidroeléctrica con triángulos de velocidades en la entrada y en la salida.

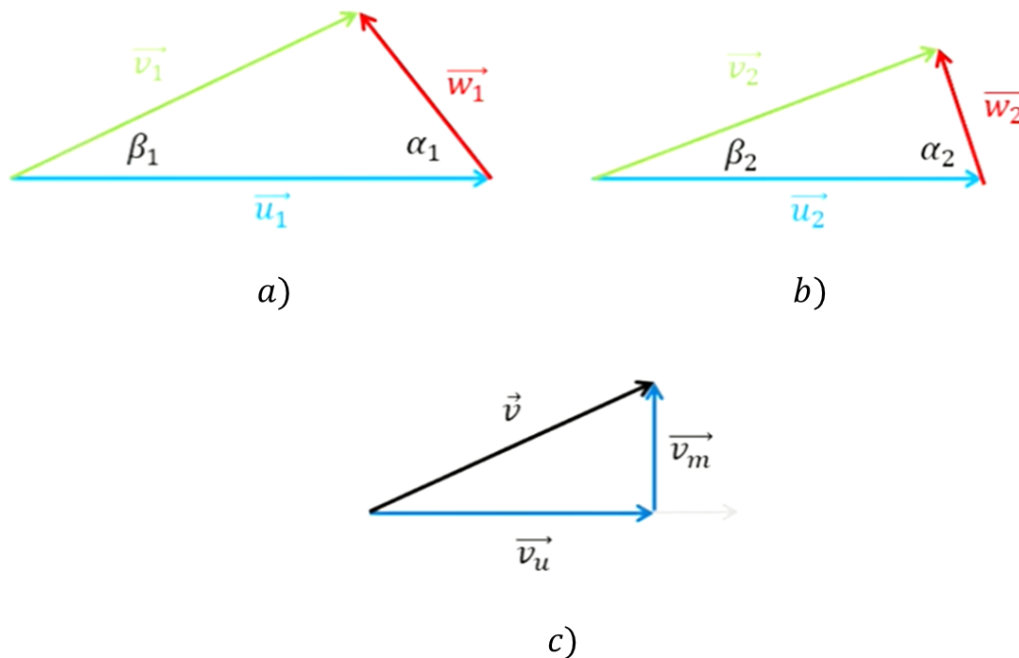


Tomado de *Mecánica de fluidos*, (p. 85), Caudex Vitelo Pañaranda, ECOE (2024).

En la figura 12, *Diagrama de un rotor de una turbina hidroeléctrica con triángulos de velocidades en la entrada y en la salida*, se puede observar los triángulos de velocidades absolutas \vec{v}_1 para la entrada y \vec{v}_2 para la salida y sus componentes respectivas: \vec{u}_1 y \vec{u}_2 para las velocidades tangenciales y \vec{w}_1 y \vec{w}_2 para las velocidades relativas, respectivamente. Ordenando los triángulos de velocidades se tienen las figuras 13 a) y b), *Triángulo de velocidades. a) Entrada. b) Salida. c) Proyección meridional*, (González, 2022), en ella también aparecen los ángulos β y α , en donde el ángulo β es el que se forma entre la velocidad absoluta y la velocidad tangencial, así mismo, el ángulo α es el que se forma entre la velocidad relativa y la velocidad tangencial, respectivamente para los triángulos de entrada y salida de la turbina (Sánchez, 2018).

Figura 13.

Triángulo de velocidades. a) Entrada. b) Salida. c) Proyección meridional.



Tomado de *Fluidos, Bombas e Instalaciones Hidráulicas*, (p. 206), Salvador de las Heras, UPC (2024).

El triángulo c de la imagen 13 c), *Triángulo de velocidades. a) Entrada. b) Salida. c) Proyección meridional*, corresponde a una proyección del vector \vec{v}_u sobre el plano meridional del vector velocidad absoluta o relativa, en esta proyección aparece el componente periférico de \vec{v}_u , así mismo, la componente meridional \vec{v}_m (Rojas Forero & Ponguta Castellanos, 2021). Cada una de estas componentes son usadas para determinar la energía mecánica que es transferida del fluido hacia el rotor de la turbina y establece la relación entre el trabajo impreso en la turbina y el cambio angular del fluido (Bideris-Davos & Vovos, 2023).

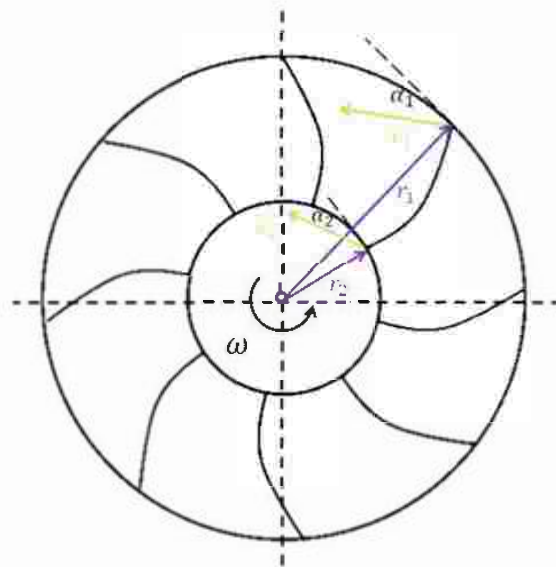
2.6.3. Ecuación de Euler

Una vez definido los triángulos de velocidades correspondientes a los triángulos que se forman a partir del intercambio de energía del caudal a energía mecánica para la turbina, se procede a presentar la ecuación de Euler para la recuperación de la energía en la altura del agua,

correspondiente a la altura útil de la carga de agua (Andrade Navia & Olaya Amaya, 2023). Para ello es necesario definir los vectores posición \vec{r}_1 y \vec{r}_2 , correspondientes a las posiciones de la partícula puntual de la entrada y salida de la turbina como se muestra en la figura 14, *Diagrama de un Rotor de una turbina con vectores posición y velocidad absoluta*, necesarios para el análisis de la ecuación de Euler (Gummer, 2011).

Figura 14.

Diagrama de un Rotor de una turbina con vectores posición y velocidad absoluta.



Tomado de *Fluidos, Bombas e Instalaciones Hidráulicas*, (p. 207), Salvador de las Heras, UPC (2024).

Se tiene entonces que, el momento dinámico rotacional T provisto por el producto punto de los vectores posición \vec{r} y velocidad \vec{v} es la suma de todos los momentos dinámicos en la entrada y salida de los vectores \vec{r}_1 y \vec{v}_1 junto con los vectores \vec{r}_2 y \vec{v}_2 , respectivamente, dando como resultado la siguiente expresión:

$$T = \sum_{sal,i} [\rho Q (\vec{r} \times \vec{v})]_i - \sum_{ent,j} [\rho Q (\vec{r} \times \vec{v})]_j \quad (3)$$

El producto cruz se resuelve mediante la siguiente expresión:

$$\vec{r} \times \vec{v} = r v \text{sen}(90 + \alpha) = r v \cos(\alpha) \quad (4)$$

Reemplazando la ecuación (4) para cada uno de los elementos correspondientes en la ecuación (5) y resolviendo se tiene que:

$$T = \rho Q r_1 v_1 \cos(\alpha_1) - \rho Q r_2 v_2 \cos(\alpha_2) \quad (5)$$

Multiplicando la velocidad angular ω para ambos lados de la ecuación (5) para mantener la igual se tiene lo siguiente:

$$T\omega = \rho Q \omega r_1 v_1 \cos(\alpha_1) - \rho Q \omega r_2 v_2 \cos(\alpha_2) \quad (6)$$

Conociendo que la potencia o trabajo es $P = T\omega$, se procede a reemplazar en la ecuación (6) y se presenta:

$$P = \rho Q \omega r_1 v_1 \cos(\alpha_1) - \rho Q \omega r_2 v_2 \cos(\alpha_2) \quad (7)$$

De igual manera, descomponiendo el vector v_1 y v_2 a sus componentes periféricas quedaría que:

$$v_{u1} = v_1 \cos(\alpha_1) \quad (8)$$

$$v_{u2} = v_2 \cos(\alpha_2) \quad (9)$$

Reemplazando las ecuaciones (9) y (8) en la ecuación (7), se tiene lo siguiente:

$$P = \rho Q \omega r_1 v_{u1} - \rho Q \omega r_2 v_{u2} \quad (10)$$

Considerando que $u_1 = \omega r_1$ y $u_2 = \omega r_2$, reemplazando en (10) quedaría:

$$P = \rho Q u_1 v_{u1} - \rho Q u_2 v_{u2} \quad (11)$$

Teniendo en cuenta que la potencia P que puede suministrar a la turbina es igual a $\rho Q g H_u$.

En donde:

- ρ es la densidad del fluido [kg/m³].
- Q es el caudal [m³/s].
- g es gravedad en [m/s²].
- H_u es altura de la carga de agua [m].

Se cuenta con la siguiente expresión:

$$\rho Q g H_u = \rho Q u_1 v_{u1} - \rho Q u_2 v_{u2} \quad (12)$$

Nótese que los elementos ρQ se repiten para todos los miembros y se pueden simplificar por agrupación, dejando así la ecuación de Euler en términos $g H_u$. Despejando H_u se obtendría la siguiente expresión:

$$H_u = \frac{u_1 v_{u1} - u_2 v_{u2}}{g} \quad (13)$$

La ecuación (13), presenta la primera forma de la ecuación de Euler, en ella, se puede observar el elemento H_u , representa la altura útil aprovechada por el rotor, es decir, es la energía de recuperación que tiene el rotor una vez que haya pasado la carga de agua de la altura útil de la turbina (L. Wang et al., 2020). No obstante, resulta poco práctico debido a que los componentes presentados dependen de los ángulos α y β anteriormente presentados, por lo que, resulta conveniente encontrar una expresión que no dependa de encontrar los ángulos mencionados. Para ello se utilizará ley de coseno para hallar la expresión que satisfaga los requerimientos necesarios (Shikama et al., 2021).

Tomando como referencia la figura 13 a) y 13 b), *Triángulo de velocidades*. a) *Entrada*. b) *Salida*. c) *Proyección meridional*, el triángulo respectivo nos proporciona información útil para determinar, con ley de cosenos, lo siguiente:

$$w^2 = u^2 + v^2 - 2uv \cos(\alpha) \quad (14)$$

Sabiendo anteriormente que, $v_u = v \cos(\alpha)$, se reemplaza la ecuación (14) en la ecuación (13) y se despeja los elementos uv_u , obteniendo como resultado:

$$uv_u = \frac{u^2 - w^2 + v^2}{2} \quad (15)$$

Reemplazando la ecuación (15) para cada elemento correspondiente en la ecuación (13) se expresa lo siguiente:

$$H_u = \frac{u_1^2 - w_1^2 + v_1^2 - (u_2^2 - w_2^2 + v_2^2)}{2g} \quad (16)$$

Reagrupando y realizando fracciones parciales a los elementos correspondientes se tiene lo siguiente:

$$H_u = \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} - \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \quad (17)$$

2.7. Criterio de selección para rotor de una turbina hidroeléctrica

El criterio principal para la selección de una turbina hidroeléctrica toma base en el concepto de las revoluciones específicas, para ello, determinar la potencia neta de instalación en la cual la turbina va a operar es de vital importancia (Cuenca-Navarrete et al., 2021). Otros criterios de selección son las condiciones hidráulicas del sitio o el impacto ambiental, sin embargo, el criterio de las revoluciones específicas es de gran utilidad porque está normalizado para todas las turbinas y determina el giro en [rpm] a la cual giraría una turbina para que, con un salto de 1 [m], se pueda generar un caballo de vapor 1 [CV] (Caricimi et al., 2022).

Y para ellos se expresa la potencia con la siguiente expresión:

$$P_t = \gamma * Q * H_n * \eta_t * \eta_g \quad (18)$$

En donde:

- P_t es potencia nominal de la turbina [kW].
- γ es el peso específico del agua [kN/m³].
- H_n es la carga neta [m].

- η_t es el rendimiento de la turbina.
- η_g es el rendimiento del generador.

Con esos parámetros definidos, se procede a calcular las revoluciones específicas n_s con la siguiente expresión (Caricimi et al., 2022):

$$n_s = \frac{N * P_t^{\frac{1}{2}}}{H_n^{\frac{5}{4}}} \quad (19)$$

Donde:

- n_s son las revoluciones específicas.
- N son las revoluciones de la turbina.
- P_t es la potencia nominal.
- H_n es la carga neta de la turbina.

La tabla 5, *Tipos de turbina Francis en función de n_s y altura*, muestra las clasificaciones de la turbina Francis para las diferentes velocidades específica. En ella agruparon los diferentes tipos de rodete en función de las velocidades específica y altura. El criterio de las revoluciones específicas determina el dimensionamiento correcto de los elementos que constituyen a la turbina (Pérez-Cantillo et al., 2022). En añadidura, permiten un análisis más detallado para el aprovechamiento de la energía del recurso hídrico disponible, garantizando la adaptación de los diferentes escenarios de operación que se pueden presentar dentro del SEP (Carbajal Cruzado, 2020)

Tabla 5.*Tipos de turbina Francis en función de n_s y altura*

Tipos de turbina Francis en función de n_s y altura		
n_s [RPM]	Rodete Francis	Altura [m]
55 – 70	Francis muy lenta	400 – 200
70 – 120	Francis lenta	200 – 100
120 – 200	Francis normal	100 – 50
200 – 300	Francis rápida	50 – 25
300 – 450	Francis muy rápida	25 – 15

2.8. Generador síncrono

Un generador síncrono, también conocido como máquina síncrona, es un dispositivo eléctrico que produce corriente alterna con frecuencia y voltaje constantes, sincronizados con la velocidad de rotación del rotor (Paraguay Cconovilca, 2021). Un generador síncrono está compuesto por un rotor giratorio, un estator estacionario con devanado del campo, y en el caso de un rotor saliente, un devanado en el rotor. El núcleo del rotor concentra el flujo magnético, y el sistema de excitación suministra la corriente para crear el campo magnético. Juntos, estos componentes garantizan la producción de energía eléctrica con una calidad constante y sincronizada con la velocidad de rotación del generador síncrono

2.9. Dinamómetro de 4 cuadrantes emulador de turbina hidroeléctrica:

El Dinamómetro/Fuente de alimentación de 4 cuadrantes es un dispositivo de laboratorio capaz de ofrecer dos modos de trabajo, como se muestra en la figura 15, *El Dinamómetro/Fuente de alimentación 4 cuadrantes Modelo 8960-3*. En el modo Dinamómetro, puede actuar como freno o motor configurable, mostrando parámetros como velocidad y potencia mecánica (Didactic Festo, 2023). En el modo Fuente de alimentación, se convierte en una fuente de tensión CC, corriente CC o alimentación CA, mostrando voltaje, corriente y potencia eléctrica. Para fin del presente trabajo se detallará del apartado

hidroeléctrico. El Dinamómetro/Fuente de alimentación de 4 cuadrantes modelo 8960-3 dispone de las siguientes funciones activadas:

- Fuente estándar (Control Manual) - Modelo 8960-1.
- Fuente estándar (Control Basado en Computadora) - Modelo 8960-2.
- Emulador de turbina - Modelo 8960-3.

Figura 15.

El Dinamómetro/Fuente de alimentación 4 cuadrantes Modelo 8960-3.



Tomado de *LabVolt Series by Festo Didactic—Four-Quadrant Dynamometer/Power Supply (8960-F0)*, FESTO, 2023, Labvolt Festo.

https://labvolt.festo.com/solutions/6_power_energy/50-8960

2.9.1. Detalles técnicos

Los detalles de interés del funcionamiento son el ángulo de las paletas, velocidad de la variación de las paletas y la inercia, puesto que, son aquellas que se podrán modificar para satisfacer los intereses del proyecto, estas últimas se pueden modificar en el ordenador mediante un cable USB (Didactic Festo, 2023). En el módulo de simulación hidroeléctrica emula una turbina Francis de 300 w. El emulador permite el estudio de generación síncrona de instalaciones hidroeléctricas a pequeña y gran escala. Una vez adquirido el módulo, mediante

USB, se podrá descargar el software para controlar el y adquirir datos del módulo (Didactic Festo, 2023).

2.9.2. Software LVSIM – EMS

El software LVSIM – EMS es un software de simulación utilizado en el ámbito educativo y técnico para estudiar y analizar sistemas de energía eléctrica y distribución. Es parte de la gama de productos de simulación desarrollados por la compañía Lab-Volt que permite la emulación de varios componentes y sistemas eléctricos reales en un entorno real (Didactic Festo, 2023). Este software permite a los usuarios simular el comportamiento de equipos eléctricos como generadores, transformadores, líneas de transmisión, sistemas de control de potencia, y otros elementos en un sistema de energía. Es útil en la enseñanza de principios de ingeniería eléctrica y energías renovables, permitiendo a los estudiantes realizar experimentos y pruebas sin contar con equipo físico.

Los equipos electromecánicos para laboratorio son emulados con gran precisión (Festo, 2023), indica que el entorno de trabajo se puede ajustar de tal manera que cumpla con todas las necesidades establecidas en este proyecto. También tiene interfaz de control y adquisición de datos para los instrumentos computarizados, en él se observa el comportamiento de parámetros de interés como voltaje, corriente, potencia, velocidades, pares, entre otros.

3. Capítulo III: Diseño del Proyecto

3.1. Metodología

La metodología a usarse es una de tipo mixta, ya que tiene métodos tanto cualitativos como cuantitativos, de forma que en el presente documento se recopilarán datos tales como la potencia mecánica, voltaje, revoluciones por minuto, energía, porcentaje de apertura de los álabes de la turbina hidroeléctrica, para su posterior análisis en las prácticas a realizar. Estas prácticas se harán en el laboratorio de la carrera de electricidad usando un modelo dinamómetro de cuatro cuadrantes específicamente con la característica de emulador de turbina hidroeléctrica.

Para fines de obtener mejores resultados y cumplir con los objetivos planteados en los diferentes escenarios de operación, estas prácticas se complementarán con el módulo de motor/alternador síncrono de 4 polos, del mismo fabricante, con la finalidad del correcto funcionamiento en conjunto de los equipos mediante la compatibilidad ofrecida haciendo uso de una correa dentada como elemento de acople mecánico.

El módulo que se utilizará realiza la simulación haciendo uso de una máquina de corriente continua de imanes permanentes, permitiendo que su comportamiento se asemeje al de una turbina hidroeléctrica con un generador síncrono. La característica principal es la velocidad de par en el eje del módulo, que imita la forma de operación de una turbina tipo Francis. El control de ésta en la simulación es posible modificando el ángulo de los álabes, ya sea directamente con el módulo o en el firmware especializado.

El objetivo de la simulación es operar una central hidroeléctrica de pequeña o gran escala, permitiendo un análisis en la generación de este tipo de energía renovable, fundamental para suplir la demanda energética en Ecuador, prescindiendo de acudir a centrales reales con acceso limitado.

Finalmente es necesario limitar el alcance del presente documento, ya que, la simulación de generación eléctrica mediante una turbina hidroeléctrica se realizará en el laboratorio para así, obtener un análisis profundo sobre los escenarios de operación planteados.

3.1.1. Descripción del módulo dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes

El Dinamómetro/Fuente de alimentación de 4 cuadrantes es un dispositivo de laboratorio capaz de ofrecer dos modos de trabajo, como dinámetro o fuente de alimentación, esto enfocado en la generación de energía eléctrica, concretamente en las tecnologías de generación renovables tales como solar fotovoltaica, eólica e hidroeléctrica (Festo D. , 2023).

3.1.2. Parámetros de función - Emulador de turbina hidráulica

En la tabla 6, *Parámetros de función en la interfaz del módulo*, se muestran los parámetros característicos con lo que se puede configurar el módulo en la función de turbina hidráulica.

Tabla 6.

Parámetros de función en la interfaz del módulo.

Control de la válvula	Deslizador o entrada de comando del modulo
Tipo de turbina	300W, Francis
Velocidad máxima de las válvulas (%/s)	10.0
Inercia del rodete ($kg * m^2$)	0.300
Relación de la polea	24:24 (acoplamiento por correa de distribución)
Tipo del termistor	Ninguno
Estado	Detenido o Marcha

Control de válvula: Selecciona el modo de control de los álabes ajustables de la turbina hidráulica, la opción deslizador permite controlar manualmente la apertura de los álabes, estos se aumentan su apertura correspondiente a medida que el deslizador se desplaza hacia arriba, su apertura disminuye al desplazar el deslizador hacia abajo. La opción entrada de comando del módulo permite modificar los álabes de la misma forma detallada anteriormente, pero con la entrada física del módulo.

Tipo de turbina: Se puede seleccionar el tipo de turbina a utilizar, para el caso actual solo se puede simular una turbina tipo Francis de 300W. Sin embargo, en un futuro próximo estarán disponibles las turbinas Kaplan y Pelton utilizando el mismo equipo físico.

Velocidad máxima de las válvulas: Ajusta la velocidad máxima a lo cual los álabes ajustables de la turbina hidráulica pueden abrirse o cerrarse, se alcanza la velocidad máxima de álabes cuando el deslizador control de servomotor hidráulico de los álabes se ajusta completamente hacia arriba o hacia abajo. Todas las demás posiciones causan que los álabes abran o cierren a la fracción correspondiente de esta velocidad máxima.

Inercia del rodete: Define el momento de inercia del rodete en el emulador de turbina hidráulica, cuanto mayor sea el momento de inercia del rodete, mayor será la oposición de la turbina hidráulica a todo cambio de velocidad. El intervalo de entrada de este parámetro es de $0,005 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ a $1,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

Relación de la polea: Define la relación de transmisión entre el Dinamómetro/ Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes y la máquina de prueba, para el presente caso será el generador síncrono, en este caso siempre será 24:24 debido a que es la polea existente en el laboratorio de electricidad.

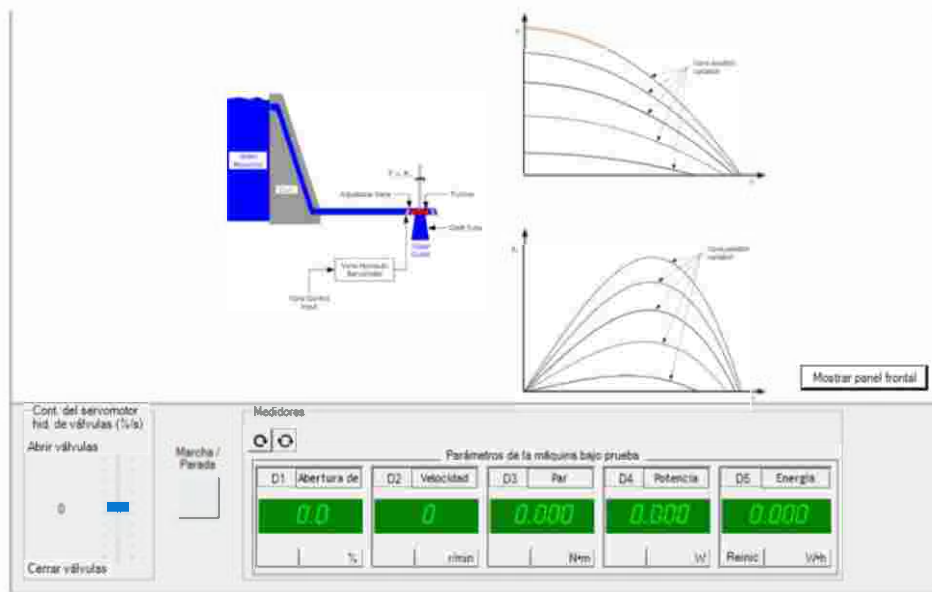
Tipo del termistor: Selecciona el tipo de termistor para el presente caso no se usará algún termistor.

Estado: Permite poner en marcha o detener la función actualmente seleccionada.

En la figura 16, *Interfaz Dinamómetro/Fuente De Alimentación Para Turbina Hidroeléctrica*, se muestra la interfaz de operación donde el usuario controla la turbina hidroeléctrica mediante la variación de sus parámetros.

Figura 16.

Interfaz Dinamómetro/Fuente De Alimentación Para Turbina Hidroeléctrica.



Tomado de *LabVolt Series by Festo Didactic—Four-Quadrant Dynamometer/Power Supply (8960-F0)*, FESTO, 2023, Labvolt Festo.

https://labvolt.festo.com/solutions/6_power_energy/50-8960

3.1.3. Especificaciones técnicas del módulo

En la tabla 7 se presentan las especificaciones técnicas del dinamómetro de cuatro cuadrantes.

Tabla 7.

Especificaciones Técnicas del dinamómetro de cuatro cuadrantes.

Modo Dinamómetro	Parámetros
Par magnético	0 - 3N*m (0 a 27 lbf-in)

Sentido de rotación	0 - 2500 r/min
Potencia nominal	350W
Modo Fuente de Alimentación	
Tensión CC	0 a +- 150V
Tensión CA (RMS)	0 - 105V (sin carga)
Corriente continua	0 a +- 5A
Corriente alterna (RMS)	0 – 3,5A
Potencia máxima de salida	500W
Frecuencia corriente alterna	10 – 120Hz

Funciones de control

Conjuntos activos	Funciones estándar (control manual)
	Funciones estándar (control por PC)
	Emulador de turbina (Hidráulica y Eólica)
	Cargador de baterías de plomo-acido
	Emulador de panel solar

Entradas de control

Comandos	0 a +- 10V
Termistor	10K Ω , tipo 1
Salidas de control	
Codificador de eje	En cuadratura (A-B)
Sensibilidad de salida de par	0,3 N*m/V (2,655 lbf-in/V)
Sensibilidad de salida de velocidad	500 r/min/V
Puerto de comunicación	USB 2.0
Requisitos del módulo	120V – 6A – 60Hz

Características físicas

Dimensiones (A x L x Prof.)	308x268x490mm
Peso neto	19,5kg (43,0lb)

3.2. Selección de Instrumentos y Equipos

3.2.1. Módulo dinamómetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes (8960-F):

En la figura 17, *Dinamómetro/fuente de Alimentación de Cuatro Cuadrantes Modelo 8960-F con la función de emulador de Turbina Hidráulica*, se muestra el panel frontal del módulo, así como la interfaz con la que el usuario va interactuar para simular la operación de la turbina hidráulica.

Figura 17.

Dinamómetro/fuente de Alimentación de Cuatro Cuadrantes Modelo 8960-F con la función de emulador de Turbina Hidráulica.



Tomado de Presentation - Four Quadrant Dynamometer/Power supply – LabVolt Series 8960-20, Festo Didactic – LabVolt Series, 2012.

3.2.2. Módulo fuente de alimentación variable (8525-20)

Es el componente de trabajo principal, ya que la mayoría de los equipos funcionan mediante la asociación a este módulo, Como se muestra en la figura 18, *Fuente de alimentación trifásica*, para poderlo conectar a la red tiene un conector con enclavamiento de forma que evita desconexiones accidentales haciendo más seguro el ambiente de trabajo en el laboratorio. Necesita una conexión trifásica además del neutro y la tierra. Proporciona fuentes de alimentación tanto variables como fijas en corriente alterna o continua, la capacidad total del módulo son 2kW entre las salidas que lo componen (FESTO, 2023d). El módulo está disponible con fines académicos en el Laboratorio de Potencia de la carrera de Electricidad de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

Figura 18.

Fuente de alimentación trifásica.



Tomado de *variable power supply (8525-0)*, Festo (2023).

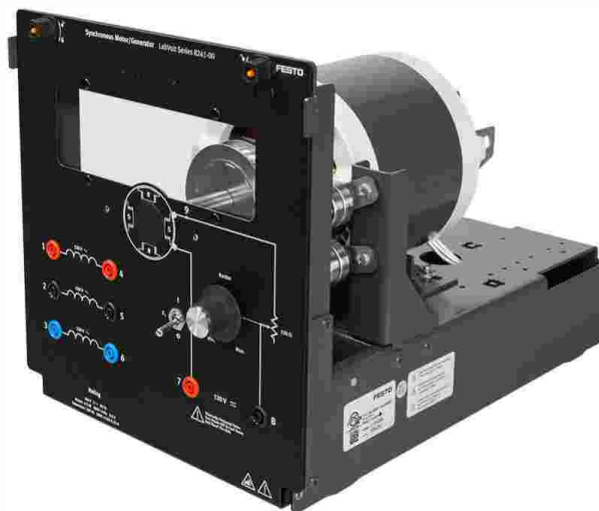
https://labvolt.festo.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-8525-20_variable_power_supply

3.2.3. Módulo alternador/motor síncrono (8241)

En la figura 19, *Motor/Generador Síncrono de 4 polos*, se muestra el módulo de alternador/motor síncrono tiene una alimentación trifásica y una capacidad máxima de 0,2 kW, consumir o entregar energía según el uso. Los dos devanados se encuentran de forma gráfica en el panel frontal del módulo, por lo tanto, permite hacer conexiones en delta o estrella, se excita de forma variable en corriente continua a través de anillos colectores y escobillas externas, estos elementos se conectan a un reóstato que finalmente es controlado por un interruptor principal. Bajando la parte frontal del módulo es posible utilizar una correa dentada en la polea del eje de la máquina (FESTO, 2023). Elemento que sea usado para acoplarlo mecánicamente al módulo dinámetro/fuente de alimentación de cuatro cuadrantes. El módulo está disponible con fines académicos en el Laboratorio de Potencia de la carrera de Electricidad de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

Figura 19.

Motor/Generador Síncrono de 4 polos.



Tomado de *Synchronous Motor/Generator*, Festo (2023).

https://labvolt.festo.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-8241-00_synchronous_motor_generator

3.2.4. Módulo de cargas resistivas (8311-05)

El módulo de cargas resistivas este compuesto por nueve resistencias de potencia, configuradas en 3 bancos, es decir, cada banco contiene un total de 3 resistencias con valores de 300Ω , 600Ω y 1200Ω , en la figura 20, *Módulo de cargas Resistivas*, se observa que se tiene la opción de combinarse mediante los interruptores de palanca con los que cuenta de forma individual, esto permite una operación versátil, se pueden usar en sistemas trifásico y monofásicos (FESTO, 2023b). Utilizando este módulo exploraremos como afectan a los parámetros de un sistema de generación a través de una turbina hidráulica el aumento o disminución de las cargas resistivas. El módulo está disponible con fines académicos en el Laboratorio de Potencia de la carrera de Electricidad de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

Figura 20.

Módulo de cargas Resistivas.



Tomado de *Resistive Load*, Festo, (2023) https://labvolt.festo.com/solutions/50-8311-00_resistive_load

3.2.5. Módulo de cargas inductivas (8321-06)

El módulo de cargas inductivas este compuesto por nueve inductancias de potencia, configuradas en 3 bancos, es decir, cada banco contiene un total de 3 inductancias con valores de 14H; 4400 Ω , 7H; 2200 Ω y 3,5H; 1100 Ω , en la figura 21, *Módulo de Inductancia de carga*, se observa que se tiene la opción de combinarse mediante los interruptores de palanca con los que cuenta tienen de forma individual, dando versatilidad en la operación de los diferentes escenarios, es importante destacar que se pueden usar en sistemas monofásicos y trifásicos (FESTO, 2023a).

Estas combinaciones permiten realizar un análisis amplio del comportamiento de un sistema de generación a través de una turbina hidráulica sobre cómo afectan las cargas inductivas al sistema eléctrico general. El módulo está disponible con fines académicos en el laboratorio de potencia de la carrera de Electricidad de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

Figura 21.

Módulo de Inductancia de carga.



Tomado de *Inductive Load*, Festo (2023).

https://labvolt.festo.com/solutions/6_power_energy/50-8321-00_inductive_load

3.2.6. *Multímetro Digital*

Los multímetros digitales nos permiten medir varias magnitudes eléctricas tales como tensión, corriente, resistencia, frecuencia. Tienen una alta precisión en los valores medidos, permitiendo tomar estos valores para llevarlos a los cálculos necesarios. Cuentan con rangos de medición para una precisión minuciosa, incluso con la opción de medir parámetros en corriente continua o alterna, como se observa en la figura 22, *Multímetro Fluke – 87 v* (FLUKE, 2023).

Figura 22.

Multímetro Fluke – 87 v.



Tomado de *Fluke – 87 v*, Fluke(2024) <https://www.fluke.com/es-mx/producto/comprobacion-electrica/multimetros-digitales/fluke-87v>

3.2.7. *Pinza amperimétrica*

Para poder medir corriente es necesario hacerlo en serie en un circuito, sin embargo eso no es posible o la mejor opción en la mayoría de casos, por lo tanto, esta herramienta permite medir corriente sin necesidad de interrumpir el circuito, para el caso específico se utilizó el modelo de la marca UNI-T, como lo muestra la figura 23, *Pinza Amperimétrica*, que permite una

medición de true rms, obteniendo datos más fiables en el momento de tomar la medición, con la opción de tomar datos en miliamperios (mA), volviéndose aún más fiable los resultados obtenidos (Escobar Betancur et al., 2021).

Figura 23.

Pinza Amperimétrica.



Tomado de *Pinza Amperimétrica Digital Unit UT207B*, UNIT, (2024).

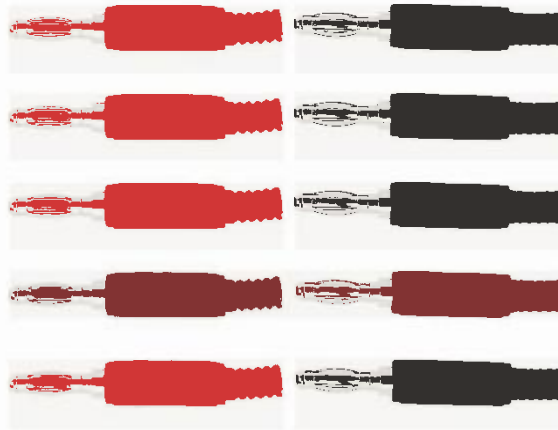
<https://osakaelectronicsltda.com/instrumentacion-y-medicion/pinzas-voltiamperimetricas/pinza-amperimetrica-digital-true-rms-1000a-ut207b.html>

3.2.8. Conectores tipo banana

Para realizar las prácticas de laboratorio se utilizaron conectores tipo banana mostrados en la figura 24, *Conductor con terminal tipo banana*, adecuados para usarlos en los módulos descritos. Este elemento está disponible con fines académicos en el laboratorio de potencia de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

Figura 24.

Conductor con terminal tipo banana.



Tomado de *Conductor tipo banana*, Walmart, (2024)

<https://www.walmart.com.mx/ip/electricidad/conector-tipo-banana-tamano-estandar-maximo-32a-conector-tipo-banana-tipo-linterna-para-accesorios-de-seguridad/00561339119059>

3.3. Procedimiento de las Prácticas

Para realizar las siguientes practicas se tomaron consideraciones para le protección personal y la de los equipos utilizados, haciendo cambios en el conexionado o maniobras únicamente si los equipos se encontraban apagados y desconectados. En el módulo dinamómetro no se realizó ninguna intervención mecánica durante su funcionamiento, el caso de existir alguna inconsistencia de funcionamiento se recomendó el apagado inmediato del mismo para mantener la integridad del equipo. Antes de comenzar cada práctica o escenario de operación el tutor inspeccionaba detalladamente el conexionado para evitar posibles fallas, mecánicas o eléctricas, posteriormente se iniciaba. Finalmente las practicas realizadas se encuentran detalladas en la sección de anexos.

3.3.1. Práctica 1: Turbina hidroeléctrica en vacío

En la presente práctica, se analizó el comportamiento del módulo, en vacío, analizando los parámetros de tensión, velocidad de rotación, par, en el rotor, potencia mecánica para posteriormente graficar los resultados obtenidos y verificar como se relacionan entre sí, se utilizó el módulo de fuente de alimentación, el alternador/motor síncrono, que fue acoplado al módulo dinamómetro mediante una correa de distribución.

3.3.2. Práctica 2: Turbina hidroeléctrica utilizando banco de resistencias

Para esta práctica se consideró el estudio del efecto de agregar cargas resistivas a un sistema en funcionamiento, como afectaría a los parámetros de voltaje, par, velocidad de rotación y la potencia mecánica. Para esto se utilizó el módulo de fuente de alimentación, el módulo de banco de resistencia, el alternador/motor síncrono, que fue acoplado al módulo dinamómetro mediante una correa de distribución. Como consideraciones iniciales se toman en cuenta que se iniciará con una sola resistencia por línea de 300 ohm, la siguiente simulación será con resistencias de 600 y 300 ohm en paralelo y para ambos casos llevaremos el módulo a una velocidad de 1700 rpm, para acercarnos a la nominal.

3.3.3. Práctica 3: Turbina hidroeléctrica utilizando banco de inductancias

Para esta práctica se consideró el estudio del efecto de agregar cargas inductivas a un sistema en funcionamiento, como afectaría a los parámetros de voltaje, par, velocidad de rotación y la potencia mecánica. Para esto se utilizó el módulo de fuente de alimentación, el módulo de banco de inductancias, el alternador/motor síncrono, que fue acoplado al módulo dinamómetro mediante una correa de distribución. Como consideraciones iniciales se toma en cuenta que se iniciará con una sola inductancia por línea de 0,8 henrios, la siguiente simulación será con inductancias de 1,6 y 0,8 henrios en paralelo, finalmente se utilizarán inductancias de 3,2; 1,6; 0,8 henrios en paralelo, es decir, en total se analizarán 3 casos. Para todos los casos llevaremos el módulo a una velocidad de 1700 rpm, para acercarnos a la nominal.

3.3.4. Práctica 4: Efecto de la variación de la inercia del rodete de una Turbina hidroeléctrica

En la presente práctica se plantea el estudio de cómo afectan las variaciones de la inercia del rodete del módulo a la resiliencia de un sistema al añadirle carga, para ello se realizaron escenarios de operación con inercias diferentes, agregándole una misma carga en cada escenario, de forma de observar la respuesta inercial frente a esa variación. Para esto se utilizó el módulo de fuente de alimentación, el módulo de banco de resistencias, el alternador/motor síncrono, que fue acoplado al módulo dinamómetro mediante una correa de distribución. Como consideraciones iniciales se toma en cuenta que se tomarán velocidades de rotación de control, la inicial será de 1700 rpm, para acercarnos a la nominal y la velocidad de rotación final de control será de 550, por lo tanto, se tomará el tiempo que se demore el módulo en llegar hasta ese límite.

Capítulo IV: Discusión de los Resultados

En la práctica 1 podemos observar que los parámetros de tensión y el par, están estrictamente ligados a la velocidad de rotación ya que, tiene una relación directamente proporcional e inversamente proporcional respectivamente. La tensión, es un parámetro que se ve afectado por la velocidad de rotación de forma que cuando uno llegue a su valor nominal el otro también lo hará. Por otro lado, la velocidad de rotación también depende del porcentaje de apertura de la válvula, ya que, cuanto mayor sea la apertura la válvula mayor será la velocidad nominal alcanzada y en un periodo más rápido de tiempo, no obstante el abrir la válvula a un porcentaje determinado no implica que alcancemos un número lineal de rpm, esto se debe a la falta de un control preciso, por ende, se debe variar los parámetros de apertura de válvula de forma controlada observando el comportamiento del módulo sin hacer cambios bruscos.

Con los datos obtenidos práctica 2, mediante las gráficas obtenidas podemos observar el efecto de la resistencia en un sistema eléctrico, la afectación de parámetros como el voltaje

que va decayendo conforme pasa el tiempo, esto se debe a la nueva corriente que está circulando provocando una caída de voltaje, además de como disminuyen las rpm debido al nuevo par eléctrico que existe, que se opone al par mecánico que tenía el generador síncrono, para sistemas eléctricos con grandes inercias el añadir carga no representa una afectación instantánea, esto les permite poder realizar los cambios adecuados para recuperar la caída de tensión, velocidad de rotación y la potencia que puede entregar el sistema.

Culminada la práctica 3, se constató que añadir cargas inductivas, no tiene un efecto tan drástico en los parámetros del sistema, sin embargo, provoca cambios, como elevar el voltaje, por lo tanto, la velocidad de rotación, esto puede causar afectaciones graves, ya que, así como el bajo voltaje es dañino tener sobre voltaje es una condición mucho más peligrosa, causando que equipos no soporten el cambio en la tensión y tengan consecuencias como daños al equipo o a personas. A pesar de esto el sistema puede compensar de forma rápida la adición de esta carga, sin variar tanto los parámetros analizados.

Finalmente, al realizar la práctica 4 se obtuvo que la respuesta inercial bajo cada escenario de operación responde a que entre más grande sea la inercia del rodete de una máquina de generación síncrona, podrá adaptarse de mejor manera a los cambios constantes en la carga, como es el caso real de la demanda, ya que, esta nunca se encuentra de forma estática. A una inercia más grande le corresponde un mayor tiempo para alcanzar la velocidad de rotación de control, por ende, ante perturbaciones, el escenario con mayor inercia del rodete podrá responder de mejor manera si se le añaden cargas que en un escenario donde se tiene una inercia baja.

4. Conclusiones

La implementación del dinamómetro de cuatro cuadrantes en el laboratorio de electricidad permite desarrollar simulaciones precisas y controladas acerca del comportamiento de una turbina hidroeléctrica para distintos escenarios de operación. De esta manera, el análisis de los parámetros de control como la inercia del rodete, apertura de álabes y velocidad rotacional de la turbina, con relación a los parámetros de interés como la potencia suministrada, la tensión de línea y frecuencia del sistema es más evidente y completa, contribuyendo a la comprensión de los factores que intervienen en el desempeño de la turbina hidroeléctrica. En añadidura, se complementa cada escenario con la fundamentación teórica respectiva, en donde, los resultados experimentales no solo son registrados y analizados, sino también comparados y constatados con las aplicaciones reales de operación en la generación hidroeléctrica.

Para lograr el desarrollo de cada una de las simulaciones de la turbina hidroeléctrica mediante la implementación del dinamómetro de 4 cuadrantes en el laboratorio de electricidad se destacó fundamentos teóricos y prácticos, resaltando la coherencia de dichos fundamentos para llevar a cabo las simulaciones con los requerimientos necesarios, los cuales se detallan a continuación:

- La correcta selección de los parámetros iniciales es fundamental para replicar las condiciones reales de operación de una turbina hidroeléctrica. Este proceso incluye identificar y ajustar variables como la velocidad de apertura de álabes, la inercia del rodete y la carga a utilizar con los bancos de resistencia. Estos ajustes iniciales garantizan que el dinamómetro pueda operar de manera precisa y efectiva como un simulador de turbina hidroeléctrica en un sistema eléctrico de potencia controlado y, con ello, proporcionar los datos necesarios para el análisis del comportamiento característico de la turbina hidroeléctrica en todos los escenarios propuestos.

- La comparación de resultados bajo diferentes configuraciones permite evaluar cómo la inercia, el ángulo del álabe y otros factores influyen en el rendimiento de la turbina, en donde, es destacable a la relación de la inercia con la estabilidad del sistema, en ello, se puede evidenciar que, a mayor inercia del rodete, se obtiene un sistema más estable en los parámetros de tensión y frecuencia. Este análisis proporciona una comprensión más detallada de las relaciones entre los parámetros de control y su impacto en la eficiencia del sistema, de esta manera, se valida los datos experimentales de las simulaciones junto con aspectos teóricos relacionados, afianzando así, el comportamiento que tiene la turbina hidroeléctrica para cada uno de los casos propuestos en las prácticas anexadas.
- Las diferentes condiciones de operación planteadas en las prácticas permitieron la construcción de las diversas curvas características que se presentan en el documento, de las cuales, se destaca las variaciones de tensión de línea, par, velocidad rotacional y potencia suministrada al generador a través del tiempo. En dichas curvas, se puede ver a detalle el comportamiento de la turbina hidráulica, en la cual, todos los parámetros de interés se ven afectados con una tendencia a disminuir conforme se han establecido las condiciones de operación. Teniendo así que, la turbina implementada presenta un comportamiento acorde con los fundamentos teóricos, permitiendo evaluar cómo las condiciones de operación inicial afectan la estabilidad y rendimiento del SEP simulado.

5. Recomendaciones

Como recomendaciones se plantea el uso de los adecuados equipos de protección personal para llevar a cabo cada una de las prácticas. Revisar fundamentación para validar de forma concisa lo que se obtendrá de forma experimental debe ser un elemento clave, de forma que se comprenda lo que se está realizando y los resultados obtenidos. Por otro lado, llevar un orden metodológico es esencial para evitar errores que puedan poner en riesgo la integridad de las personas, así como el correcto funcionamiento del equipo, para ello, es necesario revisar los procedimientos descritos en las prácticas que se encuentran en la sección de anexos, ya que, en este apartado se encuentra el paso a paso desarrollado de forma minuciosa.

Para el uso de los equipos necesarios para llevar a cabo las prácticas mencionadas deben seguir lo mismos lineamientos que para el módulo Dinamómetro/Fuente de alimentación de Cuatro Cuadrantes. La obtención de las gráficas relacionadas que permitirán una mejor comprensión de los resultados debe hacerse con una cantidad de datos generosa, así enriqueciendo las curvas características propias del módulo o asociada algún fenómeno eléctrico como la variación de parámetros. El operar la apertura de las válvulas de la turbina hidráulica se puede tornar una tarea tediosa, sin embargo, se debe tener mucho énfasis en el momento de abrir o cerrar la misma, debido a que un cambio muy brusco en este parámetro puede llegar afectar al equipo y los demás asociados en el momento de la práctica.

Finalmente, se recomienda que antes de entrar por completo en operar el módulo, e estudie su funcionamiento y como afecta variar los parámetros de control iniciales, en los resultados obtenidos, de forma que se pueda argumentar de una mejor manera el objetivo y conclusiones de las prácticas a realizar.

6. Recursos

6.1. Recursos Humanos

Tabla 8.

Recursos Humanos.

Nombre	Función o cargo	Aporte al proyecto
Vladimir Jaramillo García, PhD	Docente	Tutor del proyecto
Flores Castro Guido	Estudiante	Autor
Bailón Cañarte Jesús	Estudiante	Autor

6.2. Recursos Institucionales

Tabla 9.

Recursos Institucionales.

EQUIPO/LABORATORIO/ SOFTWARE (OTROS)	ÁREA	FACULTAD
Fuente de alimentación de voltaje variable	Laboratorio de Potencia	Ingeniería Eléctrica
Módulo de inductancias	Laboratorio de Potencia	Ingeniería Eléctrica
Módulo de resistencias	Laboratorio de Potencia	Ingeniería Eléctrica
Alternador síncrono	Laboratorio de Potencia	Ingeniería Eléctrica
Conectores tipo banana	Laboratorio de Potencia	Ingeniería Eléctrica

6.3. Recursos Materiales y Económicos

Tabla 10.

Recursos Materiales y Económicos.

N.º	Descripción	Cantidad	Valor unitario \$	Valor total \$
1	Módulo de Dinamómetro de 4 cuadrantes/Fuente de alimentación	1	\$ 9.782,71	\$ 9.782,71
2	Firmware turbine Emulator Function Set 579783	1	\$ 200	\$ 200
3	Correa de acoplamiento	1	\$ 30	\$ 30
4	Manual de practicas	1	\$ 20	\$ 20
5	Conectores de entradas o salidas	15	\$ 1,5	\$ 22,5
			Total	\$10.055,21

7. Cronograma

Tabla 11.

Cronograma Etapa 1.

Actividad	Meses	Año 2023																					
		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre		Enero											
Entrega del anteproyecto y petición de trabajo de titulación a tutor correspondiente		■																					
Aprobación del tema y designación de tutor.			■	■																			
Elaboración del tema de Anteproyecto.				■	■	■																	
Realizar una proforma de los costos de adquisición					■																		
Planteamiento de Objetivos y revisión del tutor.					■	■																	
Desarrollo de la propuesta.						■	■	■															
Elaboración de Antecedentes y revisión del tutor.							■	■	■														
Desarrollo de Justificación y revisión del tutor.								■	■	■													
Elaboración de Marco teórico y revisión de Fuentes bibliográficas.									■	■	■												
Planteamiento y desarrollo de Recursos.										■	■	■											
Revisión y corrección del Anteproyecto por parte del tutor											■	■	■										
Entrega del anteproyecto a la comisión académica												■	■										
Entrega del proyecto final, petición de tribunal y fecha de sustentación													■										

Tabla 12.

Cronograma Etapa 2.

Actividad	Meses	Año 2024					
		Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero
Desarrollo capítulo 1: El problema		■					
Adquisición de dinamómetro de cuatro cuadrantes		■					
Investigación bibliográfica		■	■				
Desarrollo del capítulo 2: Marco teórico			■	■			
Desarrollo del capítulo 3: Diseño del proyecto			■	■			
Seguimiento del tutor en el formato de tesis			■	■	■		
Descripción y aplicación de la metodología			■	■	■		
Desarrollo de la practicas			■	■	■	■	
Desarrollo del capítulo 4: Discusiones de los resultados			■	■	■	■	
Conclusiones de las practicas realizadas			■	■	■	■	
Revisión y corrección del proyecto de tesis					■	■	
Conclusiones del proyecto de tesis y anexos					■	■	
Entrega del proyecto al tutor de tesis						■	
Ejecución de correcciones realizadas						■	■
Entrega de proyecto final con la documentación requerida						■	■

8. Referencias bibliográficas

- Aguilera, E. A. R. (2020). Prácticas de laboratorio: La antesala a la realidad. *Revista Multi-Ensayos*, 6(11), Article 11. <https://doi.org/10.5377/multiensayos.v6i11.9290>
- Alvarez, C. G. (2024). MODELADO NUMÉRICO DE UNA TURBINA FRANCIS DE 95 MW DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SALVAJINA MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL. <https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/869ea7af-ccf8-4bce-af3d-2cce3b8879a4/content>
- Álvarez Gómez, N. (2023). Análisis de la dinámica de flujo en la turbina FRANCIS 99 con inyecciones de fluido a carga parcial. <http://hdl.handle.net/1992/69229>
- Álvarez González, H. (2022). Montaje y puesta en marcha de un simulador de la central hidroeléctrica de la Malva (Asturias) [Master's Thesis]. https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/64407/TFM_HectorAlvarezGonzalez.pdf?sequence=8
- Andrade Navia, J. M., & Olaya Amaya, A. (2023). Impactos ambientales asociados a las hidroeléctricas en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(2), 217-250. <https://doi.org/10.22490/21456453.6074>
- Bideris-Davos, A. A., & Vovos, P. N. (2023). Algorithm for Appropriate Design of Hydroelectric Turbines as Replacements for Pressure Reduction Valves in Water Distribution Systems. *Water*, 15(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/w15030554>
- Briones Soto, D. F., & Orbe Játiva, D. G. (2024). Generación eléctrica: Los nuevos retos de la generación hidroeléctrica, alternativas para su desarrollo en Ecuador. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/26229>
- Bucio-Sistos, C., López-Sosa, L. B., & Morales-Máximo, M. (2022). Análisis multiparamétrico de tres sistemas constructivos considerando indicadores de

- sustentabilidad: Ambientales, económicos y energético-funcionales. *Informes de la Construcción*, 74(567), e461. <https://doi.org/10.3989/ic.87813>
- Cajincho Ango, E. T. (2022). Plan de mejora para incrementar la producción de energía eléctrica en la central hidroeléctrica baños ii (cía. Minera volcán). <https://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/6877>
- Carbajal Cruzado, S. N. (2020). Análisis de los parámetros de operación para determinar la eficiencia de la turbina Francis en la Mini Central Hidroeléctrica Huarandoza. Repositorio Institucional - UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/56905>
- Caricimi, R., Dranka, G. G., Setti, D., & Ferreira, P. (2022). Reframing the Selection of Hydraulic Turbines Integrating Analytical Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy VIKOR Multi-Criteria Methods. *Energies*, 15(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/en15197383>
- Cayetano Gomez, J. A., Linares Delgado, R. H., & Paucar Altamirano, A. B. (2022). Análisis de parámetros de operación y su impacto en la eficiencia de turbinas Francis en la mini central hidroeléctrica de CC. NN. Betania, Perú 2022. <https://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/7149>
- Ceballos Zuluaga, J. M., Isaza Merino, C. A., Patiño Arcila, I. D., Morales Rojas, A. D., Ceballos Zuluaga, J. M., Isaza Merino, C. A., Patiño Arcila, I. D., & Morales Rojas, A. D. (2023). Análisis comparativo de las metodologías de dimensionamiento de cangilones para turbinas Pelton en sistemas de micro-generación. *Ingeniería y competitividad*, 25(1). <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i1.11797>
- Comas i Segura, M. (2022). Estudio de viabilidad de una central hidroeléctrica reversible en el Embalse de Tous (Valencia) [PhD Thesis, Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/184205>

- Combarro Marina, M. (2022). Diseño de una turbina Kaplan y posterior simulación mediante el uso de la dinámica de fluidos computacional. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/25346>
- Cuenca-Navarrete, L., Naranjo-Mantilla, M., & Buele, J. (2021). Estandarización de procesos prioritarios en la recuperación del rodete de una turbina tipo Francis. *CienciAmérica*, 10(3), 90-105. <https://doi.org/10.33210/ca.v10i3.373>
- Delgado Mansilla, J. A. (2023). Alternativas de materiales de tuberías forzadas para la pequeña Central Hidroeléctrica Mantaro. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio//handle/20.500.12404/26337>
- Didactic Festo. (2023). Four-Quadrant Dynamometer/Power Supply. https://labvolt.festo.com/solutions/6_power_energy/50-8960-DO_four_quadrant_dynamometer_power_supply
- Escobar Betancur, C. F., Garnica Palencia, I. F., & Rojas Correa, S. (2021). Implementación de ahorro energético en motores ac por medio de arrancadores suaves y variadores de velocidad. *Institución Universitaria Pascual Bravo*. <https://repositorio.pascualbravo.edu.co/handle/pascualbravo/1631>
- Espejo Cerna, G. A. (2022). Diseño de una central hidroeléctrica para generar una potencia eléctrica de 15 MW y suministrar a la provincia de Camaná, departamento de Arequipa. *Repositorio Institucional - UTP*. <http://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/7824>
- FESTO. (2023a). Inductive Load (8321-06). https://labvolt.festo.com/solutions/6_power_energy/50-8321-00_inductive_load
- FESTO. (2023b). Resistive Load (8211). https://labvolt.festo.com/solutions/50-8311-00_resistive_load

- FESTO. (2023c). Synchronous Motor/Generator (8241).
https://labvolt.festo.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-8241-00_synchronous_motor_generator
- FESTO. (2023d). Variable Power Supply (8525-2).
https://labvolt.festo.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-8525-20_variable_power_supply
- FLUKE. (2023). Multímetro Digital (DMM). <https://www.fluke.com/es-mx/informacion/blog/electrica/que-es-un-multimetro-digital>
- Fonseca, V. A. V. (2022). Control de operación en la central hidroeléctrica Aguas Vivas.
<https://repositorio.unitec.edu/xmlui/handle/123456789/12524>
- Gilberto Sotelo. (2009). Hidráulica General. Limusa.
https://www.academia.edu/38544755/Hidr%C3%A1ulica_General_Vol_1_Fundamentos_Gilberto_Sotelo_%C3%81vila
- Gómez Calderón, J. E., & Moreno Galván, J. E. (2020). Caracterizar los parámetros de diseño y funcionamiento de las turbinas hidráulicas a través de una turbina Francis, proyecto de investigación. <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/3974>
- Gómez Romero, J. A., Soto Flores, R., & Garduño Román, S. (2020). Selección de un modelo para evaluar la sostenibilidad hidroeléctrica mediante el método AHP. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 30, 117-141.
<https://doi.org/10.46661/revmetodoscuanteconempresa.3835>
- Gonzales Pareja, M. F., & Mejia Ramos, R. A. (2023). Diseñar un banco de pruebas para turbinas de micro centrales hidroeléctricas constituido por una turbina Pelton de dos inyectores y una turbina Kaplan para la generación de 1 kW. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/671146>

- González, H. Á. (2022). Montaje y puesta en marcha de un simulador de la central hidroeléctrica de La Malva. https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/64407/TFM_HectorAlvarezGonzalez.pdf?sequence=8
- Guaylla Usca, J. M., & Sinaluisa Topa, C. S. (2022). Repotenciación del banco de pruebas de la turbina Francis del Laboratorio de Turbomaquinaria de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/17780>
- Guerrero Cañar, F. F. (2024). Análisis del pasado y presente de los escenarios respecto al crecimiento de las energías renovables no convencionales en el Ecuador. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25784>
- Gummer, J. H. (2011). HYDRAULIC TURBINES. En Thermopedia. Begel House Inc. https://doi.org/10.1615/AtoZ.h.hydraulic_turbines
- Hernández, F. N. P. (2022). Fuentes energéticas renovables en Ecuador. Perspectivas a futuro. Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional, 7(3), 3. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8399839.pdf>
- Jaeseok Choi & Kwang Y. Lee. (2022). Generation System Expansion Planning with Renewable Energy. En Probabilistic Power System Expansion Planning with Renewable Energy Resources and Energy Storage Systems (pp. 127-140). IEEE. <https://doi.org/10.1002/9781119819042.ch8>
- Ji, Y., Song, H., Xue, Z., Li, Z., Tong, M., & Li, H. (2023). A Review of the Efficiency Improvement of Hydraulic Turbines in Energy Recovery. Processes, 11(6), 1815. <https://doi.org/10.3390/pr11061815>
- Leyton, N. H. (2023). Análisis de prefactibilidad para un proyecto de microgeneración hidroeléctrica a partir de estructuras existentes para el control de socavación en un río

- de montaña. Caso río Cáqueza.
<https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/2188?locale-attribute=es>
- Mantilla Rodríguez, R. M. (2020). Análisis de la política energética y la dinámica de las hidroeléctricas en el Ecuador: 2011-2017.
<https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/33372>
- Maquera Maquera, G. (2023). Análisis de desgaste en la tubería forzada mediante la medición de espesores en la Central Hidroeléctrica Aricota 2—Empresa EGESUR S.A., en el año 2018. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/3928>
- Martín, N. Q., & Infante, J. M. F. (2021). Factibilidad de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH). *Eco Solar*, 75, Article 75.
<http://ecosolar.cubaenergia.cu/index.php/ecosolar/article/view/7>
- Martín, P., & Ángel, M. (2023). Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico y calidad del agua, integrado en sistemas de información geográfica para grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la directiva marco del agua [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València].
<https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/191462>
- Medina Chalan, E. G., & Sigchi Quito, B. E. (2021). Diseño y análisis para la implementación de un sistema de pico-aprovechamiento en generación hidroeléctrica [bachelorThesis].
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21296>
- Meier, P. F. (2020). Hydroelectric: A Renewable Energy Type. En P. F. Meier, *The Changing Energy Mix* (pp. 152-184). Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/oso/9780190098391.003.0006>
- Mendez, J. (2023). Incorporación de plantas fotovoltaicas flotantes en el embalse de la hidroeléctrica Manduriacu, Ecuador. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7772889>

- Meza Aliaga, J. A. (2023). Propuesta técnica de mantenimiento preventivo de inyectores de simple efecto en turbinas pelton para la central hidroeléctrica Santiago Antúnez de Mayolo—2023. Universidad Continental.
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/13755>
- Ministerio de Energía y Minas. (2023). Balance Energético Nacional.
<https://www.rekursyenergia.gob.ec/5900-2/>
- Ministerio de Energía y Minas. (2024). Plan Nacional de Electricidad.
<https://www.rekursyenergia.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/>
- Morán, C. O. Q., Fonseca, K. V. P., Apuntes, A. P. S., Sevillano, A. G. G., Bravo, Á. J. V., & Gavilanes, F. E. Z. (2019). Energía hídrica en el Ecuador. *Ciencia Digital*, 3(2.6), Article 2.6. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i2.6.560>
- Muñoz Bolaño, A. (2024). Simulación numérica de un prototipo de turbina Kaplan [Master thesis, Universitat Politècnica de Catalunya].
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/412422>
- Naranjo-Silva, S. (2024). UNA PERSPECTIVA DEL DESARROLLO HIDROELÉCTRICO EN ECUADOR: PASADO, PRESENTE Y FUTURO. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 39(1), 63-77. <https://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.04>
- Núñez Villacís, G. S. (2021). Optimización del perfil hidráulico de un rodete tipo Francis de la Central Hidroeléctrica San Francisco.
<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/31995>
- Olmedo Falconí, A. A. (2023). Incidencia del consumo de energía eléctrica renovable en el crecimiento económico del Ecuador periodo 1990-2021. [bachelorThesis, Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo].
<http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/11444>

- Osorio, A. M., & Cifuentes, L. (2020). Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en el Oriente del departamento de Caldas. “Impactos ambientales y resistencias sociales en el posconflicto”. *Jurídicas*, 17(2), Article 2. <https://doi.org/10.17151/jurid.2020.17.2.10>
- Osorio, C. V. P. (2024). *Mecánica de fluidos—2da edición*. Ecoe Ediciones. https://books.google.com.ec/books?id=6Z8bEQAAQBAJ&pg=PA54&source=gbs_selected_pages&cad=1#v=onepage&q&f=false
- PABLO, D. V., JORGE. (2024). *Sistemas de energías renovables 2.ª edición 2024*. Ediciones Paraninfo, S.A. https://books.google.com.ec/books?id=sKR9CAAQBAJ&pg=PA1&source=gbs_toc_r&cad=2#v=onepage&q&f=false
- Palomeque, V., Valdez, I., Jara, N., & Reinoso, F. (2020). Diseño de una mini central hidroeléctrica. *RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao*, 30, 30-43. https://www.researchgate.net/profile/Nelson-Jara/publication/342328500_Disenio_de_una_mini_central_hidroelectrica/links/5eed7e65a6fdcc73be8d85ea/Diseno-de-una-mini-central-hidroelectrica.pdf
- Paraguay Cconovilca, J. (2021). Selección óptima de la turbina hidráulica para el aprovechamiento del recurso hidroenergético de la mini central hidroeléctrica de la CC.NN. Betania. Universidad Nacional del Centro del Perú. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6482>
- Peón Herrera, S. (2021). Diseño y simulación de una turbina Kaplan mediante dinámica de fluidos computacional. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/22073>
- Pérez-Cantillo, B., García-Faure, L., Fong-Barrio, J., Domínguez-Abreu, H. R., Peña-Pupo, L., Pérez-Cantillo, B., García-Faure, L., Fong-Barrio, J., Domínguez-Abreu, H. R., & Peña-Pupo, L. (2022). Control del proyecto de una mini hidroeléctrica auxiliar para una pequeña central. *Ingeniería Mecánica*, 25(2), 40-48.

http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59442022000200040&script=sci_arttext&tlng=pt

Pienika, R. (2022). Desarrollo de tecnologías para micro-aprovechamientos hidroeléctricos con bajo salto. https://www.researchgate.net/profile/Rodolfo-Pienika/publication/366595493_Desarrollo_de_tecnologias_para_micro-aprovechamientos_hidroelectricos_con_bajo_salto/links/63a9d371097c7832ca6a3b12/Desarrollo-de-tecnologias-para-micro-aprovechamientos-hidroelectricos-con-bajo-salto.pdf

Ponzoni, L., Artaza, M., Colmenares, K. L., Ludueña, A., Núñez, T., Quinteros, L., Sframeli, V., Taccone, V., Zanini, O., Zijlstra, A., Zoccali, J., Zoccali, N., & Roldos, A. (2022). Implementación de un micro generador de energía hidroeléctrica. INNOVA UNTREF. Revista Argentina de Ciencia y Tecnología. <https://revistas.untref.edu.ar/index.php/innova/article/view/1370>

Quaranta, E., Bonjean, M., Cuvato, D., Nicolet, C., Dreyer, M., Gaspoz, A., Rey-Mermet, S., Boulicaut, B., Pratalata, L., Pinelli, M., Tomaselli, G., Pinamonti, P., Pichler, R., Turin, P., Turrin, D., Foust, J., Trumbo, B., Ahmann, M., Modersitzki, M., ... Bragato, N. (2020). Hydropower Case Study Collection: Innovative Low Head and Ecologically Improved Turbines, Hydropower in Existing Infrastructures, Hydropeaking Reduction, Digitalization and Governing Systems. *Sustainability*, 12(21), 8873. <https://doi.org/10.3390/su12218873>

Quijano Rodríguez, C. E., Martínez Barragán, D. A., & Delgado Guerrero, E. J. (2021). ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINAMICO DE UN FLUIDO A TRAVÉS DE UNA TURBINA FRANCIS Y UNA TURBINA PELTON BASADOS EN LA NORMA ASME PTC 18 – 2011. <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/5941>

- Raj Shah & Stanley Zhang. (2021, abril 21). Evaluating the Efficiency of Hydropower as an Alternative Energy Source and its Effects on the Ecosystem | AltEnergyMag. <https://www.altenergymag.com/article/2021/04/evaluating-the-efficiency-of-hydropower-as-an-alternative-energy-source-and-its-effects-on-the-ecosystem/34924>
- Ramírez Bañuelos, J. F. (2022). El tratado entre México, Estados Unidos y Canadá como instrumento complementario al Acuerdo de París en la lucha contra el cambio climático. *Derecho global. Estudios sobre derecho y justicia*, 7(20), 49-75. <https://doi.org/10.32870/dgedj.v7i20.362>
- Ramirez, E. (2022). Diseño de la central hidroeléctrica para el centro poblado La Grama, distrito Eduardo Villanueva, Provincia San Marcos, Departamento Cajamarca. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/113894>
- Rea Tenelema, H. J. (2024). Generación eléctrica: Los nuevos retos de la generación hidroeléctrica, alternativas para su desarrollo en el Ecuador: análisis de la infraestructura de generación hidroeléctrica en el país y propuesta de alternativas técnicas a ser consideradas para un mejor aprovechamiento de la infraestructura existente. Análisis de casos en la región. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/26213>
- Reino Cardenas, M. I. (2022). SISTEMA INTELIGENTE PARA PREDECIR EL DESGASTE DE CANGILONES DE TURBINAS PELTON MEDIANTE EL PROTOCOLO MQTT Y REDES NEURONALES. [masterThesis, Quito, Ecuador: Universidad Tecnológica Israel]. <http://repositorio.uisrael.edu.ec/handle/47000/3333>
- Reyna, T., & Irazusta, B. (2020). EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE UNA MICRO TURBINA FRANCIS. https://www.researchgate.net/profile/Teresa-Reyna-4/publication/347766686_EVALUACION_DEL_DISENO_DE_UNA_MICRO_TUR

BINA_FRANCIS/links/5fe3af7145851553a0e62be0/EVALUACION-DEL-DISENO-DE-UNA-MICRO-TURBINA-FRANCIS.pdf

Ricondo Rodríguez, S. (2023). Cálculo y análisis numérico de una turbina hidráulica tipo kaplan utilizando técnicas CFD.

<https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/30107>

Roca Jusmet, J. (2022). La política climática y los combustibles fósiles: Una perspectiva desde la oferta. *Revista de Economía Crítica*, 2022, num. 34, p. 9-25.

<https://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/192004>

Rojas Forero, D. A., & Ponguta Castellanos, K. (2021). Modelo de apoyo para la visualización del comportamiento de una turbina francis en función de su eficiencia y ángulo de entrada mediante el software ansys. <http://hdl.handle.net/11349/26717>

Romero Hernández, C. P. (2022). Análisis del impacto del crecimiento de las megaciudades sobre el ciclo hidrológico bajo escenarios de cambio climático. Aplicación a la cuenca del río Bogotá (Colombia). [Universitat Politècnica de València].

<https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/191025>

Sánchez, C. A. M. (2018). Análisis de la eficiencia de una turbina tipo Francis con Características similiares a la de la Central Hidroelectrica San Francisco—Ecuador.

<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19561>

Sandoval Erazo, W. (2018a). Capítulo 6: Conceptos Básicos de Centrales Hidroeléctricas.

https://www.researchgate.net/publication/326560960_Capitulo_6_Conceptos_Basicos_de_Centrales_Hidroelectricas

Sandoval Erazo, W. (2018b). Conceptos Básicos de Centrales Hidroeléctricas.

https://www.researchgate.net/publication/326560960_Capitulo_6_Conceptos_Basicos_de_Centrales_Hidroelectricas

- Seippel, R. G. (2021). Fundamentos de electricidad. Reverte.
[https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=YpIUEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Seippel,+R.+G.+\(2021\).+Fundamentos+de+electricidad.+Reverte.&ots=w89KQ-i8iN&sig=_NMMsFC1vEwBjUe2jrZdXw2UnDA&redir_esc=y#v=onepage&q=Seippel%2C%20R.%20G.%20\(2021\).%20Fundamentos%20de%20electricidad.%20Reverte.&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=YpIUEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Seippel,+R.+G.+(2021).+Fundamentos+de+electricidad.+Reverte.&ots=w89KQ-i8iN&sig=_NMMsFC1vEwBjUe2jrZdXw2UnDA&redir_esc=y#v=onepage&q=Seippel%2C%20R.%20G.%20(2021).%20Fundamentos%20de%20electricidad.%20Reverte.&f=false)
- Shikama, H., Wang, T., Yamagata, T., & Fujisawa, N. (2021). Experimental and numerical studies on the performance of a waterfall-type cross-flow hydraulic turbine. *Energy for Sustainable Development*, 64, 128-138. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.09.001>
- Uğurlu, E. (2022). Renewale Energy Sources and Climate Change Mitigation. En D. Kurochkin, M. J. Crawford, & E. V. Shabliy (Eds.), *Energy Policy Advancement* (pp. 69-92). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84993-1_4
- Vasilevskaya, L. S., & Okhapkin, G. V. (2023). Technical Evaluation of Reinforced-Concrete Structures of the Zhigulevsk HPP after Long-Term Operation. *Power Technology and Engineering*, 57(1), 10-16. <https://doi.org/10.1007/s10749-023-01616-7>
- Villalva Freire, J. A. (2021). Mejoramiento del sistema de control y monitorización para el sistema de agua de enfriamiento NSAE de la Central Hidroeléctrica San Francisco. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/33210>
- Villanueva, N. M., & Ramirez, N. E. C. (2021). DISEÑO DE UN BANCO DE LABORATORIO PARA PRUEBAS DEL RODETE FRANCIS FME-28. <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/4255509d-a517-4d0d-9cd2-eb4327cc497c/content>

- Wang, L., Asomani, S. N., Yuan, J., & Appiah, D. (2020). Geometrical Optimization of Pump-As-Turbine (PAT) Impellers for Enhancing Energy Efficiency with 1-D Theory. *Energies*, 13(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/en13164120>
- Wang, R.-M., Tian, Z., & Ren, F. (2021). Energy efficiency in China: Optimization and comparison between hydropower and thermal power. *Energy, Sustainability and Society*, 11(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00311-7>
- Wilhem Rogger Limachi Viamonte. (2024). Análisis del efecto de cavitación en una turbina hidráulica de tipo francis en condiciones de operación de la C.H. Chaglla | Revista de Investigaciones. <https://revistas.unap.edu.pe/epg/index.php/investigaciones/article/view/5292><https://revistas.unap.edu.pe/epg/index.php/investigaciones/article/view/5292>
- Zegarra Macedo, R. A. (2020). Metodología para la selección del generador en una mini central hidroeléctrica. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/12606>

9. Anexos

TAREAS INTRA-CLASE: GUÍA TALLER/LABORATORIO

GUÍA DE PRÁCTICAS DE ASIGNATURA

INFORME

NOMBRE DE LA PRÁCTICA	Turbina hidroeléctrica en vacío	No. PRÁCTICA: MTH - 01
------------------------------	--	-------------------------------

DATOS INFORMATIVOS	
CARRERA:	Electricidad
CICLO/NIVEL:	Egresado
FECHA:	09/09/2024
NOMBRE DEL ESTUDIANTE:	Bailón Cañarte Jesús Roberto Flores Castro Guido Fernando
DOCENTE RESPONSABLE	Dr. Vladimir Jaramillo García

FUNDAMENTACIÓN
<ul style="list-style-type: none">• Variación del caudal en una turbina hidroeléctrica• Conversión de energía mecánica a eléctrica• Voltaje generado en generador síncrono <p>Variación del caudal en una turbina hidroeléctrica</p> <p>La apertura y cierre de los álabes directrices en una turbina hidroeléctrica controlan el caudal que pasa a través de la turbina, afectando la generación de energía y la estabilidad operativa. Los álabes se ajustan para optimizar la conversión de energía en función de la demanda eléctrica y las condiciones del sistema hidráulico. Según (Wang, Ly., Zhang, Jj. & Fan, Hg., 2023), la apertura de los álabes directrices regula no solo el caudal sino también el torque generado en la turbina, influenciando directamente la eficiencia hidráulica del sistema. A mayores aperturas, se incrementa el flujo y la velocidad de entrada del agua, mejorando el rendimiento.</p> <p>Conversión de energía mecánica a eléctrica</p> <p>La conversión de energía mecánica a eléctrica en las turbinas hidroeléctricas ocurre cuando el agua que pasa a través de la turbina mueve el rotor, generando energía mecánica. Esta energía se transfiere a un generador síncrono que convierte el movimiento rotacional en energía eléctrica mediante la interacción de los campos magnéticos del rotor y estator. Los avances en el diseño de</p>

generadores han permitido mejorar la eficiencia de esta conversión, alcanzando hasta el 95% en algunas instalaciones (Umar, Huang, & Wang, 2024).

Voltaje generado en generador síncrono

El voltaje interno generado en el estator depende de la velocidad de rotación del eje y del flujo magnético inducido sobre él, este flujo se genera por la corriente que pasa por el circuito de excitación del rotor, esto da lugar a que la tensión a la salida del generador síncrono sea igual a la tensión interna generada restando las respectivas caídas de tensión por efecto de la variación del flujo magnético en el entrehierro, efecto joule en el estator, autoinductancia y si el rotor es liso o de polos salientes (Chapman et al., 2012).

Tipo de turbina del emulador de hidroeléctrica a utilizar

- Turbina tipo Francis de 300 W

Tabla de variables de interés para cada caso

- **En vacío**

Apertura de Álabes	Velocidad de rotación de la turbina hidroeléctrica en vacío	Par en el rotor de la turbina hidroeléctrica en vacío	Potencia mecánica en el rotor de la turbina hidroeléctrica en vacío	Tensión del circuito de excitación en vacío
%	r/min	(N.m)	W	V

OBJETIVOS

Analizar el comportamiento de la tensión del circuito de excitación en vacío en función de la rotación de la turbina hidroeléctrica.

MATERIALES E INSUMOS

- Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes - LabVolt Serie 8960-32.
- Software LVDAC-EMS función Emulador de Turbina hidroeléctrica.
- Fuente de alimentación 8525-20
- Módulo de cargas resistivas 8311-05
- Alternador síncrono 8241
- Multímetro
- Cables tipo banana

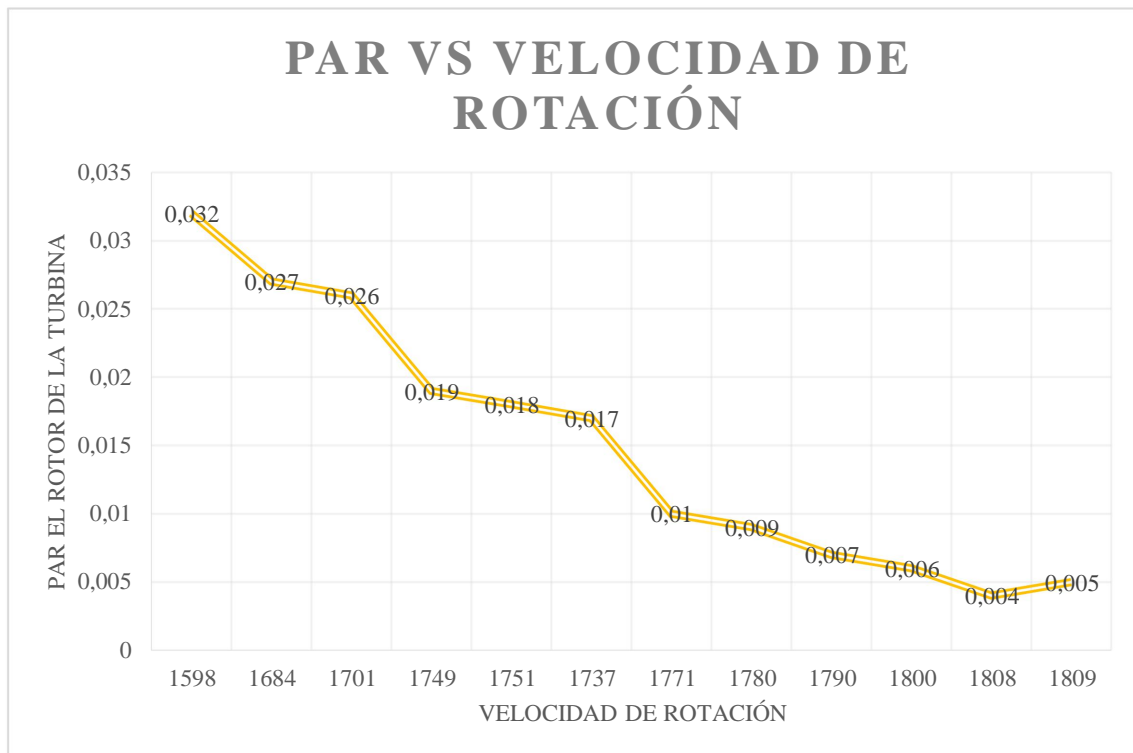
PROCEDIMIENTO		
N°	ACTIVIDADES	OBSERVACIONES
1	Colocar los Módulos necesarios en el armario de LabVolt, se debe colocar de izquierda a derecha en el primer renglón de abajo, la fuente de alimentación, seguido del dinamómetro y finalmente el alternador síncrono.	
2	Realizar la conexión en bornes en tipo estrella y alimentar en DC a la excitatriz.	
3	Conectar el multímetro para realizar la medición de tensión en bornes del alternador.	Cerciorarse de que se esté midiendo en AC.
4	Conectar un multímetro en bornes del circuito de excitación.	
5	Conectar el cable de adquisición de datos en la PC del laboratorio.	
6	Conectar el cable de alimentación del dinamómetro al mismo y luego a tomacorriente.	
7	Encender el dinamómetro y ejecutar el software LVSIM en el PC.	La opción a elegir en el software es de 120 V de alimentación y 60 Hz.
8	Configurar al módulo en opción de dinamómetro y seleccionar el software en modo turbina hidroeléctrica Francis 300 w.	Para la inercia del rodete seria: $0.30 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, velocidad máxima de apertura de alabes: 10 (%/s) y relación de polea 24:24.
9	Colocar los parámetros correspondientes en el apartado de turbina hidroeléctrica.	
10	Desplegar la tabla de datos en el software y registrar los parámetros de interés (velocidad, par, potencia y apertura de álabes)	
11	Desplazar hacia arriba el deslizador hasta obtener n% de apertura de álabes para romper la inercia del rodete y disminuir el valor % para alcanzar la estabilidad del sistema.	Con el 29% de apertura de válvulas, se puede romper la inercia, pero se debe controlar disminuyendo de forma inmediata y controlada.

12	Registrar los valores de tensión, velocidad, par, potencia y apertura de álabes.	Tomar los datos suficientes para poder graficarlos.
13	Proceder a dar parada al dinamómetro, y demás equipos en el laboratorio.	
14	Desconectar todos los equipos utilizados para la práctica.	Verificar que todo este sin tensión para maniobrar con seguridad.

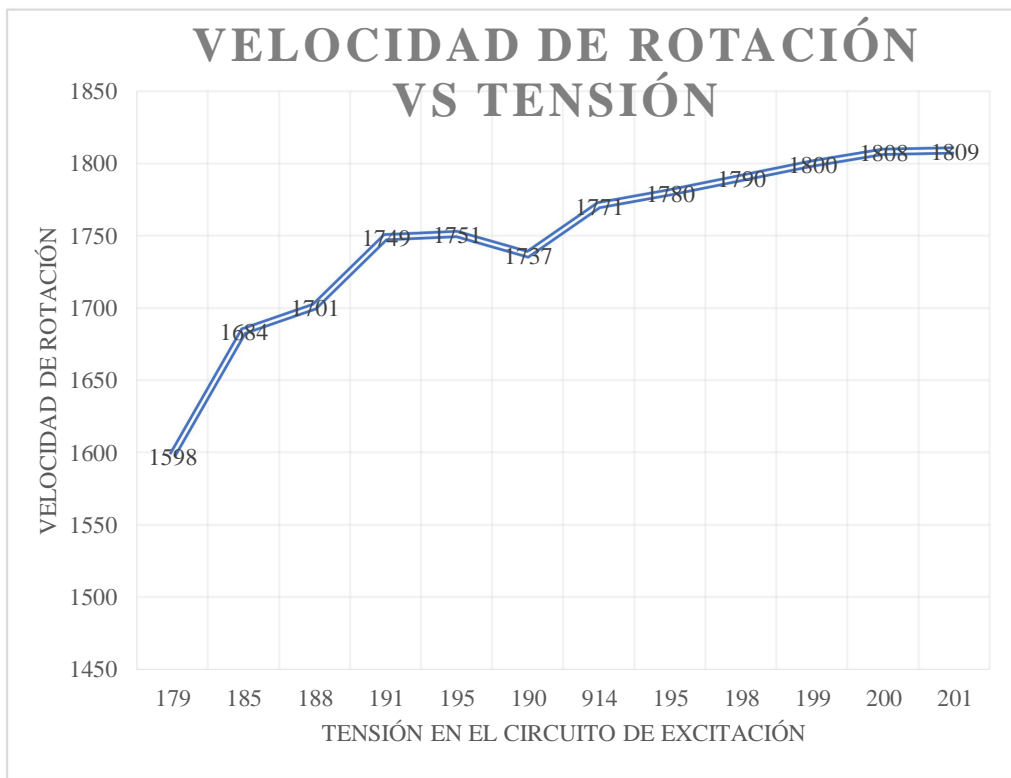
CUADRO DE RESULTADOS

Abertura de las válvulas	Velocidad de rotación de la turbina hidroeléctrica en vacío	Par en el rotor de la turbina hidroeléctrica en vacío	Potencia mecánica en el rotor de la turbina hidroeléctrica en vacío	Tensión en el circuito de excitación en vacío
(%)	(r/min)	(N•m)	(W)	(V)
13,8	1598	0,032	5,355	179
13,8	1684	0,027	4,761	185
13,8	1701	0,026	4,578	188
13,8	1749	0,019	3,407	191
13,8	1751	0,018	3,246	195
13,4	1737	0,017	3,02	190
13,5	1771	0,01	1,91	914
13,5	1780	0,009	1,678	195
13,5	1790	0,007	1,368	198
13,5	1800	0,006	1,169	199
13	1808	0,004	0,738	200
13	1809	0,005	0,871	201

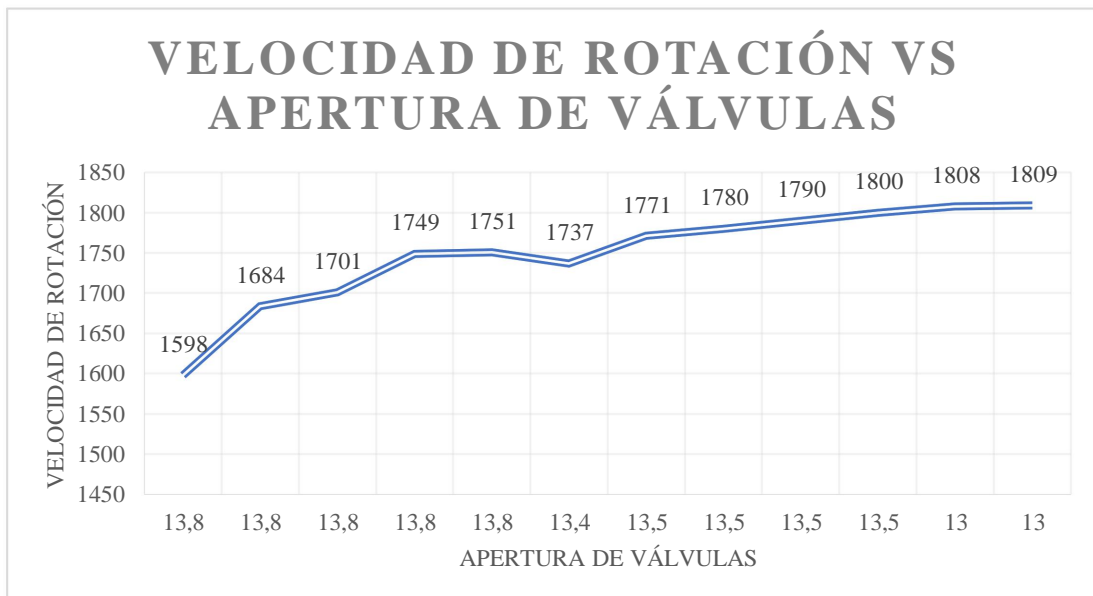
Gráfica de par con respecto a la velocidad de rotación



Gráfica de rotación con respecto a la tensión de excitación



Gráfica de velocidad de rotación con respecto a la apertura de válvulas



CONCLUSIONES

- Para concluir podemos destacar que la tensión, es un parámetro que se ve afectado por la velocidad de rotación de forma que cuando ambos uno llegue a su valor nominal el otro también lo hará. Para el módulo de turbina hidráulica el control preciso de estos parámetros se vuelve complejo ya que solo se cuenta con un deslizador para abrir o cerrar un porcentaje de apertura de la válvula, además su control no es lineal, hay que ir variando para conseguir el valor que se desea.
- La velocidad de rotación depende del porcentaje de apertura de la válvula, ya que, entre más se abra la válvula mayor será la velocidad nominal alcanzada y en un periodo más rápido de tiempo, no obstante el abrir la válvula a un porcentaje determinado no implica que alcancemos un numero lineal de rpm, esto se debe a la falta de un control preciso, por ende, se debe variar los parámetros de apertura de válvula de forma controlada observando el comportamiento del módulo sin hacer cambios bruscos.
- El par disminuye conforme la velocidad de rotación aumenta, esto se debe a que las pérdidas en el entrehierro de la máquina son proporcionales al cuadrado de la velocidad, y las pérdidas por fricción aumentan de forma gradual, entonces a medida que la velocidad de rotación aumenta el par necesario para superar estas pérdidas es menor.

BIBLIOGRAFÍA

- Chapman, S. J., Rodríguez Pérez, C., & Santana Díaz Alfredo. (2012). *Máquinas eléctricas* (5a ed). McGraw-Hill Interamericana.
- Umar, B. M., Huang, X., & Wang, Z. (23 de 08 de 2024). MPID. Obtenido de Experimental Flow Performance Investigation of Francis Turbines from Model to Prototype: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/17/7461>
- Wang, Ly., Zhang, Jj. & Fan, Hg. Optimization of closing law of turbine guide vanes based on improved artificial ecosystem algorithm. *J Hydrodyn* 35, 582–593 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42241-023-0034-y>

1. ANEXOS



Conexión de equipos e instrumentación para práctica de turbina hidroeléctrica en vacío

Fecha de Elaboración: 09/09/2024

Elaborado por: Bailón Cañarte Jesús Roberto

Flores Castro Guido Fernando

REVISADO POR:

Dr. Vladimir Jaramillo García

FECHA: 09/09/2024

TAREAS INTRA-CLASE: GUÍA TALLER/LABORATORIO

GUÍA DE PRÁCTICAS DE ASIGNATURA

INFORME

NOMBRE DE LA PRÁCTICA	Turbina hidroeléctrica utilizando banco de resistencias	No. PRÁCTICA: MTH - 02
--------------------------------------	--	-------------------------------

DATOS INFORMATIVOS	
CARRERA:	Electricidad
CICLO/NIVEL:	Egresado
FECHA:	09/09/2024
NOMBRE DEL ESTUDIANTE:	Bailón Cañarte Jesús Roberto Flores Castro Guido Fernando
DOCENTE RESPONSABLE	Dr. Vladimir Jaramillo García

FUNDAMENTACIÓN
<ul style="list-style-type: none">• Variación del caudal en una turbina hidroeléctrica• Conversión de energía mecánica a eléctrica• Voltaje generado en generador síncrono• Efecto de banco de resistencias en el voltaje del generador síncrono <p style="text-align: center;">Variación del caudal en una turbina hidroeléctrica</p> <p>La apertura y cierre de los álabes directrices en una turbina hidroeléctrica controlan el caudal que pasa a través de la turbina, afectando la generación de energía y la estabilidad operativa. Los álabes se ajustan para optimizar la conversión de energía en función de la demanda eléctrica y las condiciones del sistema hidráulico. Según (Wang, Ly., Zhang, Jj. & Fan, Hg., 2023), la apertura de los álabes directrices regula no solo el caudal sino también el torque generado en la turbina, influenciando directamente la eficiencia hidráulica del sistema. A mayores aperturas, se incrementa el flujo y la velocidad de entrada del agua, mejorando el rendimiento.</p> <p style="text-align: center;">Conversión de energía mecánica a eléctrica</p> <p>La conversión de energía mecánica a eléctrica en las turbinas hidroeléctricas ocurre cuando el agua que pasa a través de la turbina mueve el rotor, generando energía mecánica. Esta energía se transfiere a un generador síncrono que convierte el movimiento rotacional en</p>

energía eléctrica mediante la interacción de los campos magnéticos del rotor y estator. Los avances en el diseño de generadores han permitido mejorar la eficiencia de esta conversión, alcanzando hasta el 95% en algunas instalaciones (Umar, Huang, & Wang, 2024).

Voltaje generado en generador síncrono

El voltaje interno generado en el estator depende de la velocidad de rotación del eje y del flujo magnético inducido sobre él, este flujo se genera por la corriente que pasa por el circuito de excitación del rotor, esto da lugar a que la tensión a la salida del generador síncrono sea igual a la tensión interna generada restando las respectivas caídas de tensión por efecto de la variación del flujo magnético en el entrehierro, efecto joule en el estator, autoinductancia y si el rotor es liso o de polos salientes (Chapman et al., 2012).

Efecto de banco de resistencias en el voltaje del generador síncrono

Cuando se conecta una carga resistiva a un generador síncrono accionado por una turbina, el sistema experimenta varios efectos inmediatos en la corriente, tensión y potencia. A medida que aumenta la carga resistiva, la corriente del generador (IGen) incrementa instantáneamente, lo que provoca una caída de tensión en la resistencia del estator (REstátor). Esta caída de tensión, junto con el aumento en la reactancia sincrónica (Xs), causa una disminución instantánea en la tensión del generador (EGen). Debido a que el aumento en la corriente IGen es mayor que la disminución de la tensión EGen, la potencia activa (Pgen) que el generador síncrono suministra a la carga también aumenta. Sin embargo, como la tensión EGen disminuye, la potencia reactiva (QGen) intercambiada por el generador con la carga se reduce instantáneamente. Según menciona, (Hashem et al., 2021), este comportamiento es característico de los generadores síncronos, donde los cambios en la carga afectan directamente las dinámicas de corriente y tensión, así como la capacidad de manejar la potencia activa y reactiva.

Formula de caída de voltaje

$$V = I * R$$

(1)

Tipo de turbina del emulador de hidroeléctrica a utilizar

- Turbina tipo Francis de 300 W

Consideraciones iniciales

- a) Se iniciará con una sola resistencia por línea de 300 ohm, la siguiente simulación será con resistencias de 600 y 300 ohm en paralelo.
- b) Para ambos casos llevaremos el módulo a una velocidad de 1700 rpm, para acercarnos a la nominal.

- c) Una vez al alcanzado los 50 segundos desde que conectamos la carga resistiva, se aumentará la apertura de válvulas para efectos de observar el comportamiento del módulo el mayor tiempo posible.

Tabla de variables de interés para cada caso

- Banco de resistencias conectado en estrella 300 ohm

Banco de resistencias 300 ohm

Tiempo	Apertura de válvulas	Velocidad de rotación de la turbina hidroeléctrica con banco de resistencias en estrella	Par en el rotor de la turbina hidroeléctrica con banco de resistencias en estrella	Voltaje del circuito de excitación con banco de resistencias en estrella	Potencia mecánica en el eje del generador
Segundos	%	r/min	(N.m)	V	W

- Banco de resistencias conectado en estrella 600 y 300 ohm

Banco de resistencias de 600 y 300 ohm

Tiempo	Apertura de válvulas	Velocidad de rotación de la turbina hidroeléctrica con banco de resistencias en estrella	Par en el rotor de la turbina hidroeléctrica con banco de resistencias en estrella	Voltaje del circuito de excitación con banco de resistencias en estrella	Potencia mecánica en el eje de generador
Segundos	%	r/min	(N.m)	V	W

OBJETIVOS

1. Utilizar el módulo de banco de resistencias conectado en estrella, respectivamente permitiendo la evaluación del comportamiento de los parámetros como voltaje, par, velocidad y potencia mecánica.
2. Evaluar los resultados obtenidos mediante teoría basada en leyes del comportamiento de circuitos eléctricos utilizando resistencias en diferentes tipos de configuraciones.
3. Graficar los resultados de la variación de los parámetros de voltaje, par, velocidad y potencia con respecto al tiempo tomando en cuenta el efecto de la resistencia en sistemas eléctricos,

MATERIALES E INSUMOS

- Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes - LabVolt Serie 8960F-32.
- Software LVDAC-EMS función Emulador de Turbina hidroeléctrica.
- Fuente de alimentación 8525-20
- Módulo de cargas resistivas 8311-05
- Alternador sincrónico 8241
- Multímetro
- Cables tipo banana

PROCEDIMIENTO

Nº	ACTIVIDADES	OBSERVACIONES
1	Colocar los Módulos necesarios en el armario de LabVolt, se debe colocar de izquierda a derecha en el primer renglón de abajo, la fuente de alimentación, seguido del dinamómetro, el alternador síncrono y finalmente el banco de resistencias.	
2	Realizar la conexión en bornes en tipo estrella y alimentar en DC a la excitatriz.	
3	Conectar el multímetro para realizar la medición de tensión en bornes del alternador.	Cerciorarse de que se esté midiendo en AC.

4	Conectar un multímetro en bornes del circuito de excitación.	
5	Conectar el módulo de banco de resistencias en estrella con el alternador síncrono.	
6	Conectar el cable de adquisición de datos en la PC del laboratorio.	
7	Conectar el cable de alimentación del dinamómetro al mismo y luego a tomacorriente.	
8	Encender el dinamómetro y ejecutar el software LVSIM en el PC.	La opción a elegir en el software es de 120 V de alimentación y 60 Hz
9	Configurar al módulo en opción de dinamómetro y seleccionar el software en modo turbina hidroeléctrica Francis 300 w.	
10	Colocar los parámetros correspondientes en el apartado de turbina hidroeléctrica.	Parámetros iniciales: 0,30 $kg * m^2$, velocidad máxima de apertura de alabes: 10 (%/s) y relación de polea 24:24.
11	Desplegar la tabla de datos en el software y registrar los parámetros de interés (velocidad, par, potencia y apertura de álabes)	
12	Desplazar hacia arriba el deslizador hasta obtener n% de apertura de álabes para romper la inercia del rodete y disminuir el valor % para alcanzar la estabilidad del sistema.	Con el 29% de apertura de válvulas, se puede romper la inercia, pero se debe controlar disminuyendo de forma inmediata y controlada.
13	Se debe llevar el módulo a 1700 rpm, mediante el control de la apertura de válvulas.	Esto se debería lograr con el 15,5% de apertura.
14	Tratar de mantener estos rpm estables antes de activar el banco de resistencias.	

15	En la tabla de datos desplegada, se configura el temporizador para que tome datos automáticamente cada segundo.	
16	Registrar los valores velocidad, par, potencia y apertura de álabes.	Verificar que efectivamente se guarden los datos cada segundo.
17	Activar las resistencias de 300 ohm para las 3 líneas del módulo.	Se debe hacer de forma rápida, para evitar desbalance entre las fases del módulo.
18	A los 50 segundos, se variará el porcentaje de apertura de la válvula a 17,9%.	Se hace de esta manera para efectos de la práctica, de forma que se observen mejor los efectos de la carga resistiva.
19	Continuar con la toma de datos hasta que sean lo suficientes para un análisis adecuado.	
20	Proceder a dar parada al dinamómetro, y demás equipos en el laboratorio.	
21	Repetir los pasos 8 al 16 de forma ordenada.	
22	Activar las resistencias de 300 y 600 ohm para las 3 líneas del módulo.	Se debe hacer de forma rápida, para evitar desbalance entre las fases del módulo
23	A los 50 segundos, se variará el porcentaje de apertura de la válvula a 17,9%.	Se hace de esta manera para efectos de la práctica, de forma que se observen mejor los efectos de la carga resistiva.
24	Continuar con la toma de datos hasta que sean lo suficientes para un análisis adecuado.	
25	Proceder a dar parada al dinamómetro, y demás equipos en el laboratorio.	
26	Desconectar los equipos utilizados de forma ordenada.	Verificar que efectivamente todo este

		apagado para desconectar y maniobrar con seguridad.
--	--	---

CUADRO DE RESULTADOS

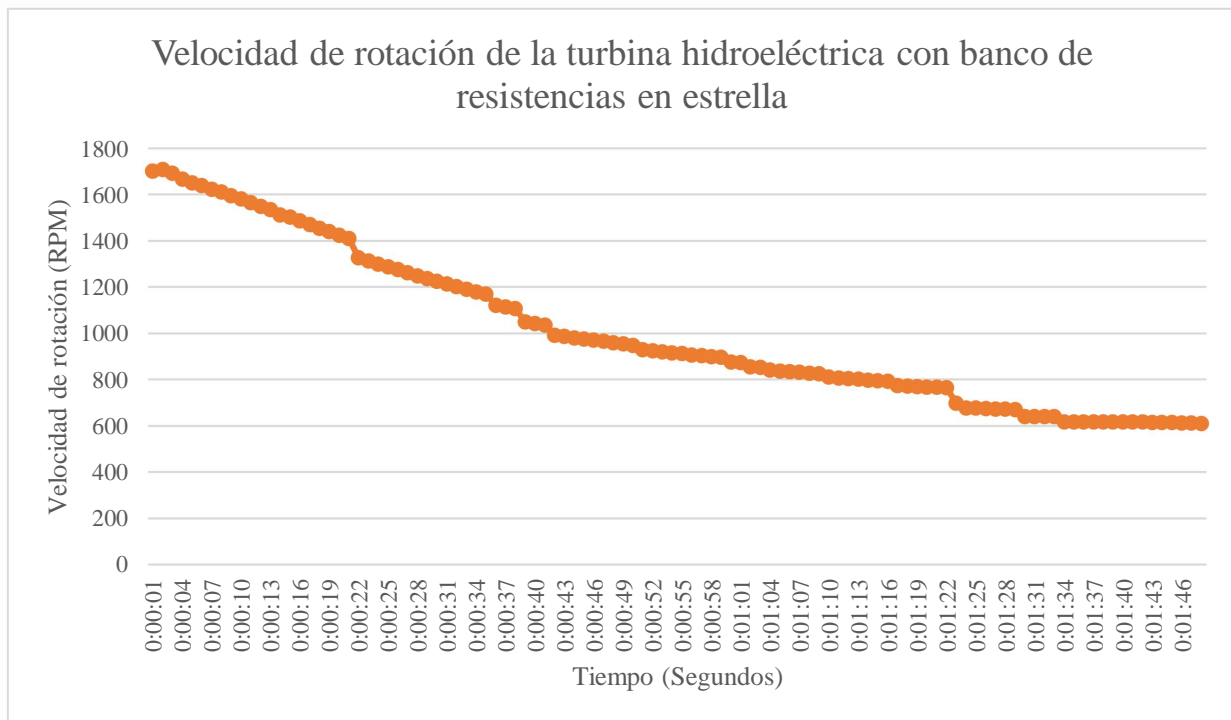
- Banco de resistencias conectado en estrella 300 ohm

Banco de resistencias 300 ohm					
Tiempo	Apertura de Álabes	Velocidad de rotación de la turbina hidroeléctrica con banco de resistencias en estrella	Par en el rotor de la turbina hidroeléctrica con banco de resistencias en estrella	Voltaje del circuito de excitación con banco de resistencias en estrella	Potencia mecánica en el eje del generador
Segundos	%	r/min	(N.m)	V	W
0:00:01	15,5	1701	0,054	187	9,69
0:00:02	15,5	1707	0,052	172	9,385
0:00:03	15,5	1692	0,327	176	57,9
0:00:04	15,5	1666	0,671	171	117
0:00:05	15,5	1650	0,667	170	115,3
0:00:06	15,5	1637	0,663	169	113,7
0:00:07	15,5	1623	0,658	167	111,8
0:00:08	15,5	1610	0,653	166	110
0:00:09	15,5	1595	0,646	164	108
0:00:10	15,5	1580	0,641	162	106,1
0:00:11	15,5	1564	0,637	161	104,3
0:00:12	15,5	1548	0,632	160	102,4
0:00:13	15,5	1533	0,627	159	100,6
0:00:14	15,5	1510	0,614	158	97,15
0:00:15	15,5	1501	0,613	157	96,32
0:00:16	15,5	1485	0,605	155	94,08
0:00:17	15,5	1470	0,599	154	92,24
0:00:18	15,5	1454	0,593	153	90,35
0:00:19	15,5	1439	0,587	150	88,41
0:00:20	15,5	1424	0,582	148	86,82
0:00:21	15,5	1410	0,579	147	85,48
0:00:22	15,5	1325	0,545	140	75,58
0:00:23	15,5	1312	0,539	138	74,07
0:00:24	15,5	1299	0,536	136	72,87
0:00:25	15,5	1286	0,528	133	71,15

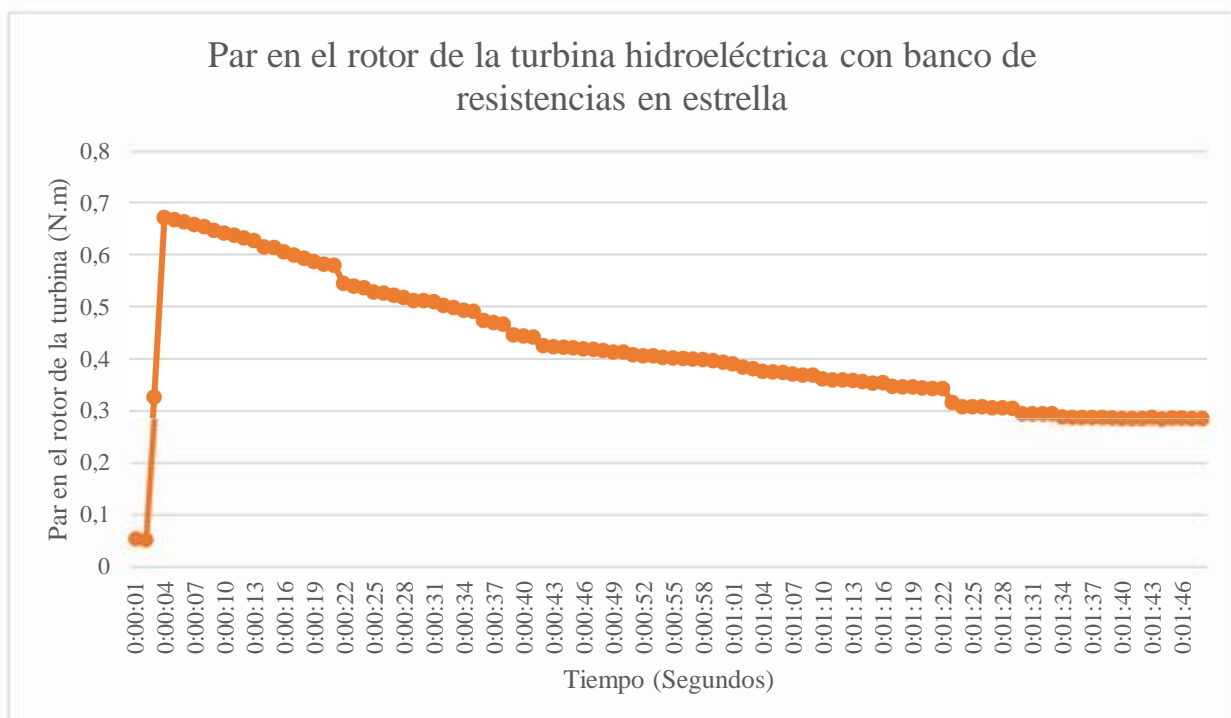
0:00:26	15,5	1274	0,526	132	70,18
0:00:27	15,5	1261	0,522	130	68,92
0:00:28	15,5	1248	0,518	129	67,74
0:00:29	15,5	1236	0,512	128	66,28
0:00:30	15,5	1224	0,512	126	65,63
0:00:31	15,5	1212	0,51	125	64,67
0:00:32	15,5	1200	0,502	123	63,12
0:00:33	15,5	1189	0,498	122	61,94
0:00:34	15,5	1178	0,493	121	60,85
0:00:35	15,5	1168	0,491	120	60,12
0:00:36	16,9	1121	0,474	116	55,63
0:00:37	17	1114	0,47	115	54,89
0:00:38	17,4	1106	0,466	114	53,96
0:00:39	17,9	1049	0,446	108	49,03
0:00:40	17,9	1042	0,444	107	48,43
0:00:41	17,9	1035	0,442	106	47,96
0:00:42	17,9	991	0,425	104	44,06
0:00:43	17,9	986	0,423	103	43,68
0:00:44	17,9	980	0,422	103	43,27
0:00:45	17,9	974	0,421	102	42,97
0:00:46	17,9	969	0,419	101	42,51
0:00:47	17,9	964	0,418	100	42,22
0:00:48	17,9	959	0,416	99	41,81
0:00:49	17,9	953	0,413	98	41,18
0:00:50	17,9	947	0,413	97	40,95
0:00:51	17,9	927	0,408	95	39,57
0:00:52	17,9	923	0,406	95	39,21
0:00:53	17,9	918	0,406	94	39,01
0:00:54	17,9	915	0,403	94	38,66
0:00:55	17,9	911	0,402	93	38,38
0:00:56	17,9	906	0,401	93	38,05
0:00:57	17,9	902	0,4	92	37,77
0:00:58	17,9	898	0,399	91	37,5
0:00:59	17,9	895	0,397	91	37,22
0:01:00	17,9	876	0,393	90	36,03
0:01:01	17,9	872	0,39	89	35,64
0:01:02	17,9	855	0,384	88	34,35
0:01:03	17,9	852	0,381	87	34,02
0:01:04	17,9	839	0,376	86	33,03
0:01:05	17,9	836	0,375	85	32,82
0:01:06	17,9	833	0,374	85	32,62
0:01:07	17,9	830	0,371	85	32,29
0:01:08	17,9	827	0,369	84	31,94
0:01:09	17,9	824	0,369	84	31,81
0:01:10	17,9	809	0,362	83	30,68
0:01:11	17,9	806	0,36	82	30,4

0:01:12	17,9	803	0,359	82	30,19
0:01:13	17,9	800	0,358	81	29,96
0:01:14	17,9	797	0,356	81	29,7
0:01:15	17,9	794	0,353	80	29,33
0:01:16	17,9	791	0,354	80	29,31
0:01:17	17,9	773	0,347	79	28,13
0:01:18	17,9	771	0,346	78	27,95
0:01:19	17,9	769	0,346	78	27,84
0:01:20	17,9	767	0,344	78	27,65
0:01:21	17,9	765	0,343	78	27,52
0:01:22	17,9	763	0,343	77	27,45
0:01:23	17,9	696	0,316	72	23
0:01:24	17,9	677	0,308	69	21,87
0:01:25	17,9	675	0,308	69	21,79
0:01:26	17,9	674	0,308	69	21,74
0:01:27	17,9	672	0,306	68	21,53
0:01:28	17,9	671	0,306	67	21,47
0:01:29	17,9	669	0,305	67	21,39
0:01:30	17,9	640	0,295	64	19,8
0:01:31	17,9	639	0,295	64	19,75
0:01:32	17,9	640	0,295	64	19,78
0:01:33	17,9	639	0,295	64	19,73
0:01:34	17,9	616	0,289	61	18,62
0:01:35	17,9	616	0,288	62	18,58
0:01:36	17,9	616	0,288	61	18,55
0:01:37	17,9	616	0,288	62	18,56
0:01:38	17,9	616	0,288	61	18,59
0:01:39	17,9	616	0,287	61	18,53
0:01:40	17,9	616	0,285	62	18,39
0:01:41	17,9	615	0,285	61	18,35
0:01:42	17,9	615	0,285	61	18,39
0:01:43	17,9	614	0,288	60	18,5
0:01:44	17,9	614	0,284	60	18,28
0:01:45	17,9	613	0,287	60	18,42
0:01:46	17,9	612	0,287	60	18,39
0:01:47	17,9	611	0,285	60	18,23
0:01:48	17,9	610	0,286	59	18,28

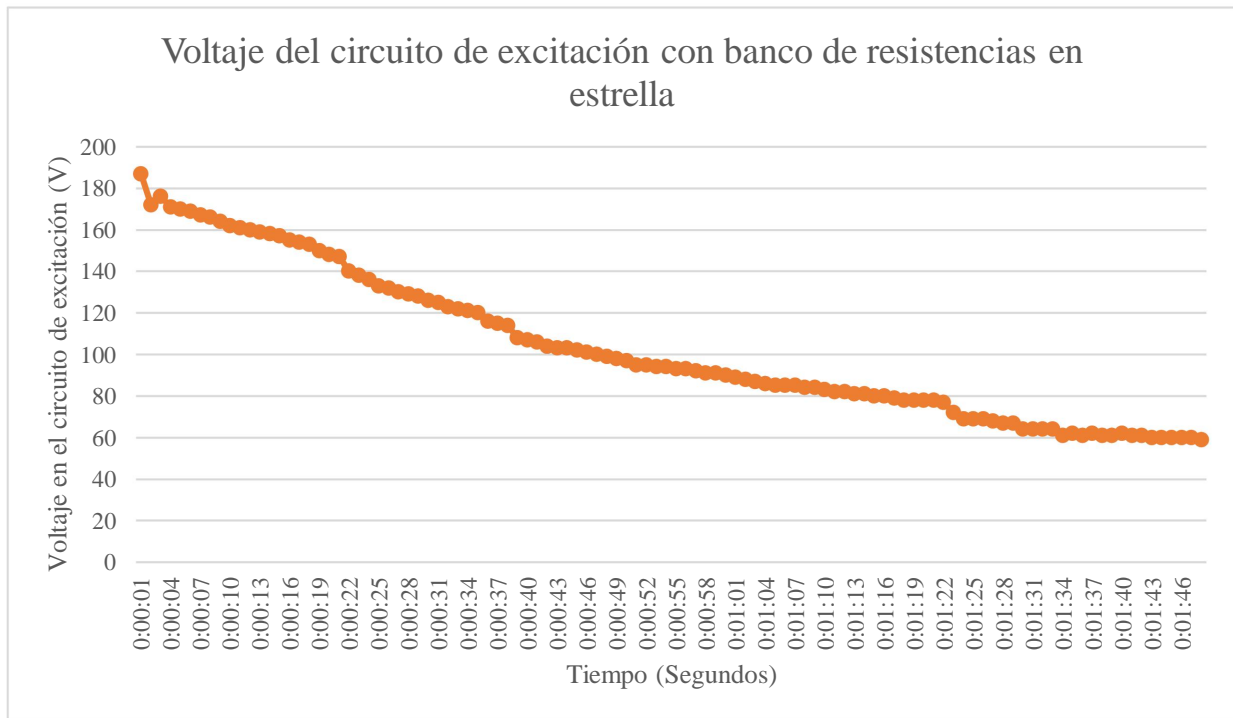
Resultados de velocidad de rotación de la turbina hidroeléctrica con respecto al tiempo



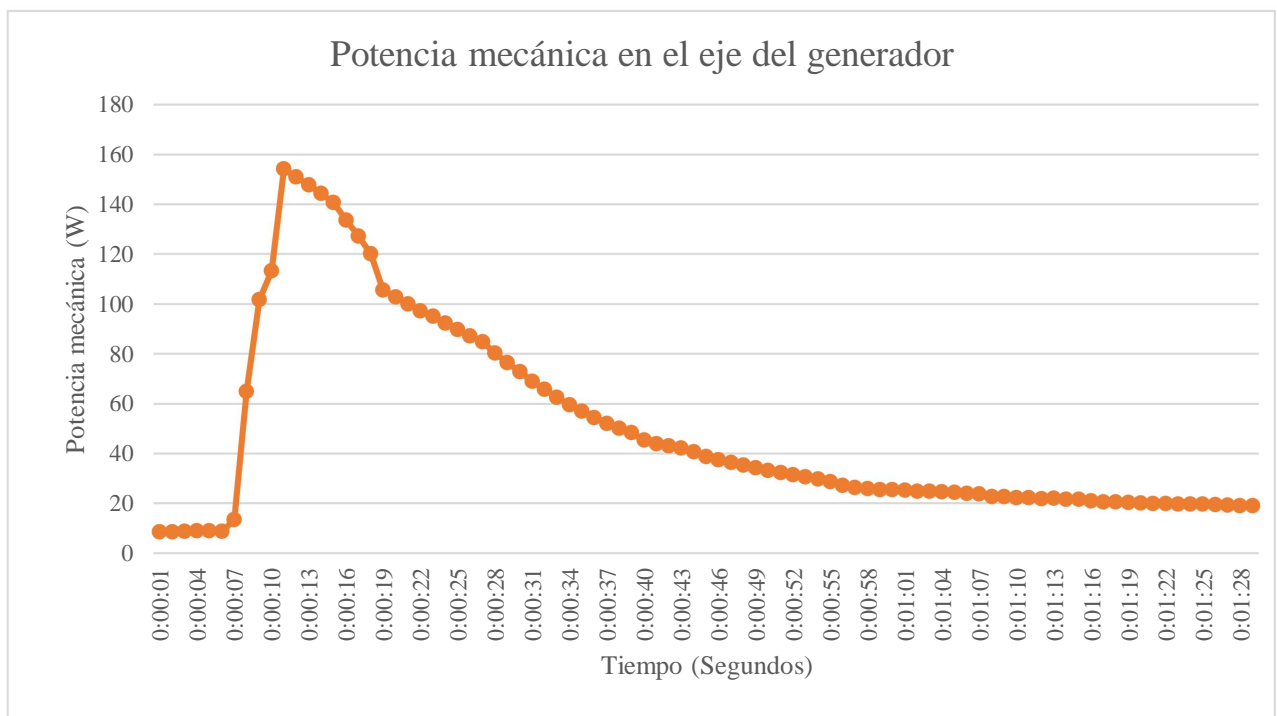
Resultados de par en el rotor de la turbina hidroeléctrica con respecto al tiempo



Resultados de voltaje del circuito de excitación con respecto al tiempo



Resultados de potencia mecánica en el eje del generador con respecto al tiempo



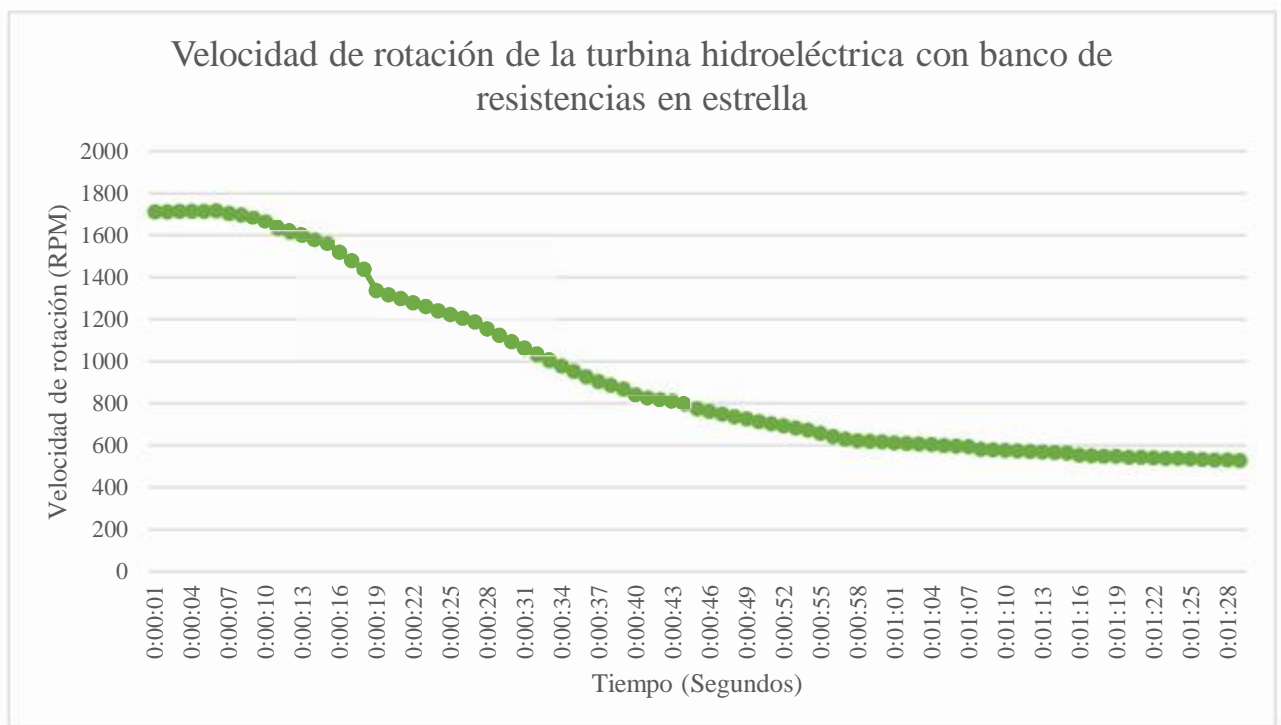
• Banco de resistencias conectado en estrella 600 y 300 ohm

Banco de resistencias 600 y 300 ohm					
Tiempo	apertura de Álabes	Velocidad de rotación de la turbina hidroeléctrica con banco de resistencias en estrella	Par en el rotor de la turbina hidroeléctrica con banco de resistencias en estrella	Voltaje del circuito de excitación con banco de resistencias en estrella	Potencia mecánica en el eje del generador
Segundos	%	r/min	(N.m)	V	W
0:00:01	15,5	1710	0,047	189	8,381
0:00:02	15,5	1711	0,047	189	8,385
0:00:03	15,5	1712	0,049	187	8,695
0:00:04	15,5	1713	0,05	187	8,969
0:00:05	15,5	1713	0,049	187	8,826
0:00:06	15,5	1715	0,049	187	8,746
0:00:07	15,5	1704	0,075	177	13,49
0:00:08	15,5	1694	0,365	179	64,75
0:00:09	15,5	1681	0,578	172	101,7
0:00:10	15,5	1661	0,651	169	113,3
0:00:11	15,5	1632	0,902	160	154,1
0:00:12	15,5	1615	0,893	159	151
0:00:13	15,5	1596	0,884	157	147,7
0:00:14	15,5	1577	0,874	156	144,4
0:00:15	15,5	1557	0,862	153	140,6
0:00:16	15,5	1515	0,843	149	133,7
0:00:17	15,5	1474	0,824	145	127,2
0:00:18	15,5	1433	0,801	142	120,2
0:00:19	15,5	1332	0,757	132	105,5
0:00:20	15,5	1312	0,748	129	102,7
0:00:21	15,5	1293	0,738	128	99,94
0:00:22	15,5	1274	0,729	126	97,27
0:00:23	15,5	1255	0,722	124	94,94
0:00:24	15,5	1236	0,713	122	92,29
0:00:25	15,5	1218	0,703	121	89,64
0:00:26	15,5	1200	0,693	119	87,15
0:00:27	15,5	1183	0,685	117	84,85
0:00:28	15,5	1149	0,668	113	80,33
0:00:29	15,5	1118	0,652	111	76,29
0:00:30	15,5	1088	0,638	109	72,69
0:00:31	15,5	1058	0,622	105	68,96
0:00:32	15,5	1030	0,609	102	65,72
0:00:33	15,5	1003	0,595	99	62,48
0:00:34	15,5	977	0,582	95	59,55

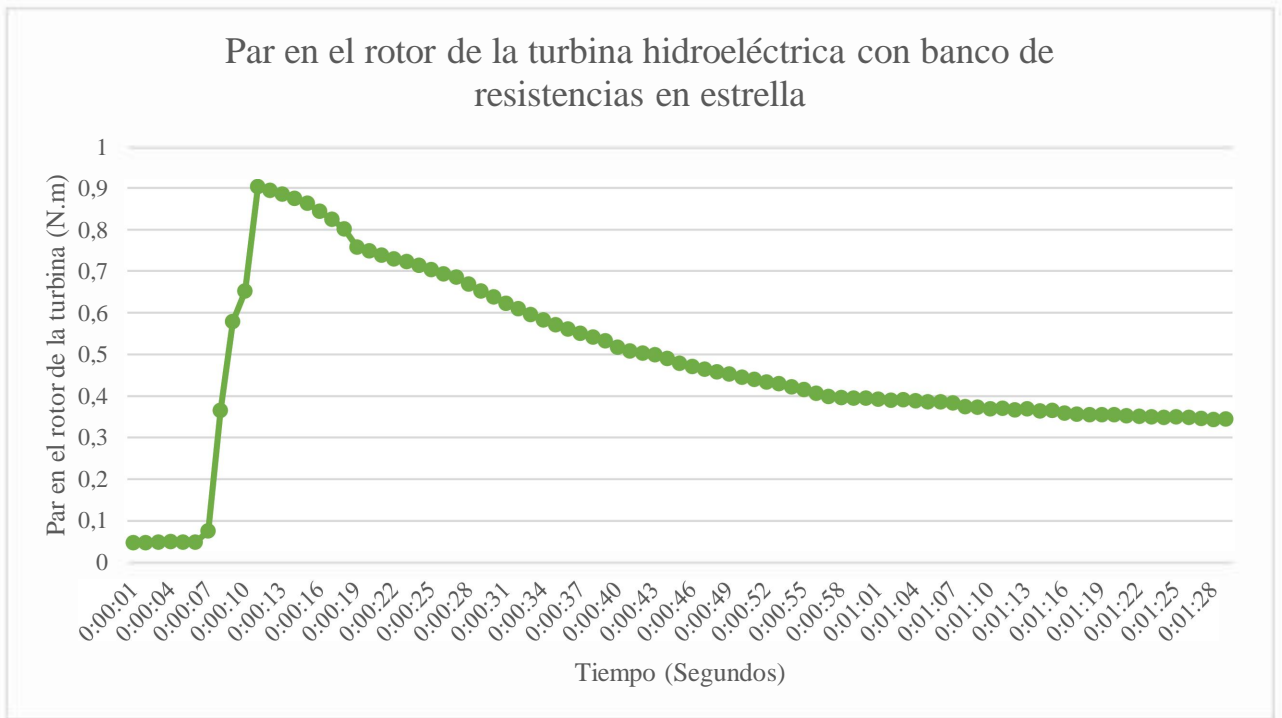
0:00:35	15,6	950	0,571	94	56,81
0:00:36	16,8	926	0,56	92	54,29
0:00:37	17,4	904	0,55	90	52,04
0:00:38	17,9	884	0,541	87	50,11
0:00:39	17,9	866	0,532	85	48,26
0:00:40	17,9	840	0,516	84	45,42
0:00:41	17,9	825	0,507	82	43,77
0:00:42	17,9	817	0,503	81	43,01
0:00:43	17,9	809	0,498	80	42,15
0:00:44	17,9	795	0,489	79	40,71
0:00:45	17,9	774	0,478	77	38,75
0:00:46	17,9	761	0,47	75	37,46
0:00:47	17,9	748	0,464	74	36,32
0:00:48	17,9	736	0,457	73	35,21
0:00:49	17,9	724	0,452	71	34,25
0:00:50	17,9	712	0,445	70	33,2
0:00:51	17,9	702	0,439	69	32,26
0:00:52	17,9	691	0,433	68	31,35
0:00:53	17,9	681	0,429	67	30,6
0:00:54	17,9	671	0,421	66	29,61
0:00:55	17,9	657	0,415	64	28,55
0:00:56	17,9	640	0,406	63	27,2
0:00:57	17,9	629	0,398	62	26,25
0:00:58	17,9	622	0,396	61	25,79
0:00:59	17,9	618	0,394	60	25,49
0:01:00	17,9	615	0,394	59	25,34
0:01:01	17,9	612	0,392	59	25,15
0:01:02	17,9	608	0,389	59	24,79
0:01:03	17,9	605	0,391	60	24,74
0:01:04	17,9	602	0,388	60	24,47
0:01:05	17,9	599	0,386	61	24,23
0:01:06	17,9	595	0,385	55	23,98
0:01:07	17,9	592	0,383	68	23,76
0:01:08	17,9	580	0,374	56	22,72
0:01:09	17,9	578	0,372	56	22,52
0:01:10	17,9	575	0,369	56	22,22
0:01:11	17,9	572	0,37	55	22,17
0:01:12	17,9	570	0,366	55	21,84
0:01:13	17,9	567	0,369	55	21,89
0:01:14	17,9	565	0,364	55	21,53
0:01:15	17,9	562	0,365	54	21,49
0:01:16	17,9	553	0,359	53	20,8
0:01:17	17,9	550	0,356	53	20,51
0:01:18	17,9	548	0,355	53	20,39
0:01:19	17,9	546	0,354	53	20,26
0:01:20	17,9	543	0,354	54	20,13

0:01:21	17,9	541	0,352	52	19,94
0:01:22	17,9	539	0,351	52	19,82
0:01:23	17,9	537	0,35	52	19,65
0:01:24	17,9	536	0,348	52	19,54
0:01:25	17,9	534	0,349	51	19,52
0:01:26	17,9	532	0,348	51	19,38
0:01:27	17,9	530	0,345	51	19,16
0:01:28	17,9	529	0,343	51	19
0:01:29	17,9	527	0,344	50	18,96

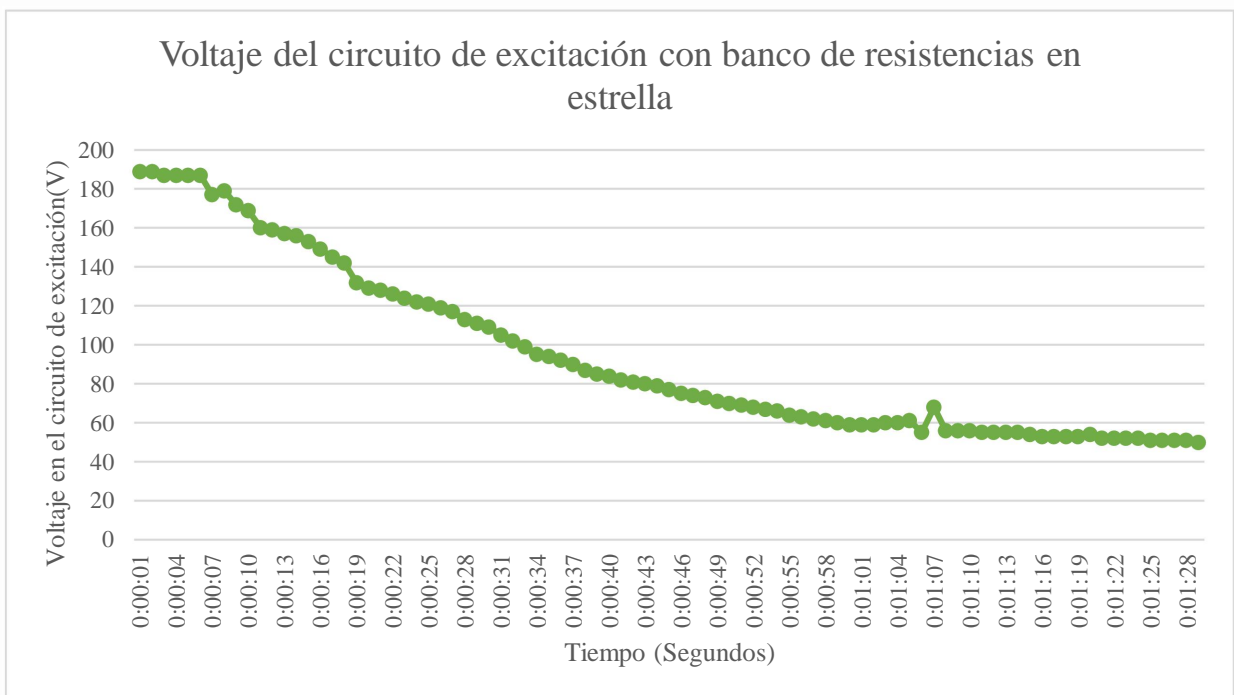
Resultados de velocidad de rotación de la turbina hidroeléctrica con respecto al tiempo



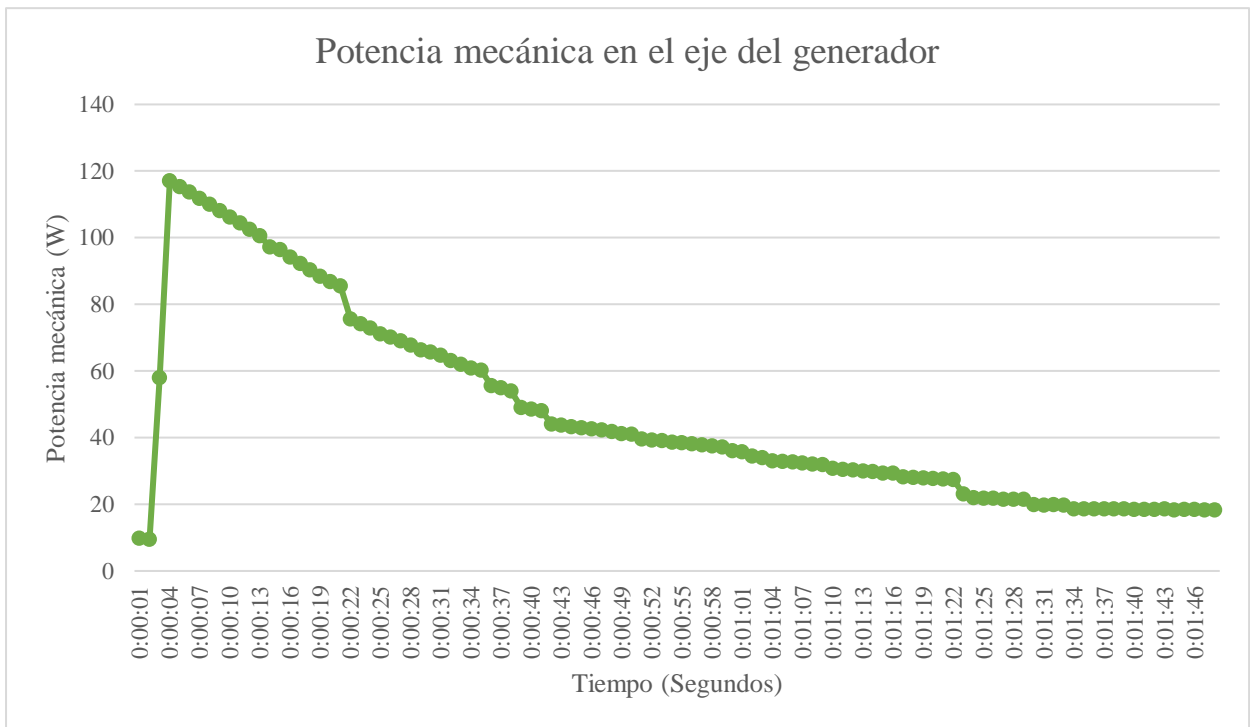
Resultados de par en el rotor de la turbina hidroeléctrica con respecto al tiempo



Resultados de voltaje del circuito de excitación con respecto al tiempo



Resultados de potencia mecánica en el eje del generador con respecto al tiempo



CONCLUSIONES

- Se concluye que para ambos casos en los que se incluyen el efecto del banco de resistencias, se tienen resultados similares. En el momento cuando se incluyen las cargas entra el concepto del par eléctrico un par eléctrico, que este se va a oponer al par mecánico del generador síncrono, dando como resultante una disminución de la velocidad de rotación, en la operación normal de centrales de generación se controla aumentando el par de la máquina, de forma que el par eléctrico y el par mecánico se encuentre estables.
- Debido al efecto de la inercia propia de cada máquina síncrona el efecto de añadir carga al sistema no es instantáneo, ya que, la característica de la inercia hace que no se frene automáticamente, es lo mismo que sucede al querer poner en marcha la turbina hidráulica, entre más grande sea la inercia, más costara empezar a mover el rodete de la misma.
- Cuando se agrega carga, la corriente del generador aumenta, haciendo que exista una caída de tensión en la resistencia del estator, además de un aumento instantáneo en la reactancia síncrona, esto genera que la tensión del generador disminuya como se observa en la gráfica del voltaje de circuito de excitación con respecto al tiempo.
- Esta caída de tensión, a su vez genera que la potencia también empieza a caer progresivamente, hasta que todos estos valores se estabilizan alrededor de las 600-500 rpm, tomando en cuenta que se aumentó el porcentaje de apertura de los alabes.

BIBLIOGRAFÍA

- Chapman, S. J., Rodríguez Pérez, C., & Santana Díaz Alfredo. (2012). *Máquinas eléctricas* (5a ed). McGraw-Hill Interamericana.
- Hashem, M., Abdel-Salam, M., El-Mohandes, M. T., Nayel, M., & Ebeed, M. (2021). Optimal placement and sizing of wind turbine generators and superconducting magnetic energy storages in a distribution system. *Journal of Energy Storage*, 38, 102497. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102497>
- Umar, B. M., Huang, X., & Wang, Z. (23 de 08 de 2024). MPID. Obtenido de Experimental Flow Performance Investigation of Francis Turbines from Model to Prototype: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/17/7461>
- Wang, Ly., Zhang, Jj. & Fan, Hg. Optimization of closing law of turbine guide vanes based on improved artificial ecosystem algorithm. *J Hydrodyn* 35, 582–593 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42241-023-0034-y>

ANEXOS



Conexión de equipos e instrumentación para práctica de banco de resistencias

Fecha de Elaboración: 09/09/2024

Elaborado por: Bailón Cañarte Jesús Roberto

Flores Castro Guido Fernando

REVISADO POR:

Dr. Vladimir Jaramillo García

FECHA: 09/09/2024

TAREAS INTRA-CLASE: GUÍA TALLER/LABORATORIO

GUÍA DE PRÁCTICAS DE ASIGNATURA

INFORME

NOMBRE DE LA PRÁCTICA	Turbina hidroeléctrica utilizando banco de inductancias	No. PRÁCTICA: MTH - 03
--------------------------------------	--	-------------------------------

DATOS INFORMATIVOS	
CARRERA:	Electricidad
CICLO/NIVEL:	Egresado
FECHA:	09/09/2024
NOMBRE DEL ESTUDIANTE:	Bailón Cañarte Jesús Roberto Flores Castro Guido Fernando
DOCENTE RESPONSABLE	Dr. Vladimir Jaramillo García

FUNDAMENTACIÓN

- Variación del caudal en una turbina hidroeléctrica
- Conversión de energía mecánica a eléctrica
- Voltaje generado en generador síncrono
- Efecto de banco de resistencias en el voltaje del generador síncrono

Variación del caudal en una turbina hidroeléctrica

La apertura y cierre de los álabes directrices en una turbina hidroeléctrica controlan el caudal que pasa a través de la turbina, afectando la generación de energía y la estabilidad operativa. Los álabes se ajustan para optimizar la conversión de energía en función de la demanda eléctrica y las condiciones del sistema hidráulico. Según (Wang, Ly., Zhang, Jj. & Fan, Hg., 2023), la apertura de los álabes directrices regula no solo el caudal sino también el torque generado en la turbina, influenciando directamente la eficiencia hidráulica del sistema. A mayores aperturas, se incrementa el flujo y la velocidad de entrada del agua, mejorando el rendimiento.

Conversión de energía mecánica a eléctrica

La conversión de energía mecánica a eléctrica en las turbinas hidroeléctricas ocurre cuando el agua que pasa a través de la turbina mueve el rotor, generando energía mecánica. Esta energía se transfiere a un generador síncrono que convierte el movimiento rotacional en energía eléctrica mediante la interacción de los campos magnéticos del rotor y estator. Los avances en el diseño de

generadores han permitido mejorar la eficiencia de esta conversión, alcanzando hasta el 95% en algunas instalaciones (Umar, Huang, & Wang, 2024).

Voltaje generado en generador síncrono

El voltaje interno generado en el estator depende de la velocidad de rotación del eje y del flujo magnético inducido sobre él, este flujo se genera por la corriente que pasa por el circuito de excitación del rotor, esto da lugar a que la tensión a la salida del generador síncrono sea igual a la tensión interna generada restando las respectivas caídas de tensión por efecto de la variación del flujo magnético en el entrehierro, efecto joule en el estator, autoinductancia y si el rotor es liso o de polos salientes (Chapman et al., 2012).

Efecto de banco de inductancias en el voltaje del generador síncrono

Cuando se incrementa una carga inductiva conectada a un generador sincrónico accionado por una turbina, varios parámetros clave cambian instantáneamente. En primer lugar, la corriente del generador (IGen) y la potencia reactiva (QGen) aumentan de forma inmediata. Este incremento en la corriente genera una caída de tensión en la resistencia del estator (REstátor) y un aumento en la reactancia sincrónica (Xs), lo que causa una disminución instantánea en la tensión del generador (EGen). Debido a esta reducción en la tensión, la potencia activa (PGen) que el generador suministra a la carga disminuye levemente y también de forma instantánea.

El fenómeno descrito anteriormente es crítico en las plantas hidroeléctricas, en ellas, la capacidad de manejar tanto la potencia activa como la reactiva influye en la estabilidad del sistema y en su eficiencia general. Según lo sostiene, (Kundur, 1994), la regulación precisa de la potencia reactiva es esencial para evitar fluctuaciones importantes en la tensión, especialmente en situaciones donde se conectan cargas inductivas

Tipo de turbina del emulador de hidroeléctrica a utilizar

- Turbina tipo Francis de 300 W

Consideraciones iniciales

- d) Se iniciará con una sola inductancia por línea de 0,8 henrios, la siguiente simulación será con inductancias de 1,6 y 0,8 henrios en paralelo, finalmente se utilizarán inductancias de 3,2; 1,6; 0,8 henrios en paralelo. En total se analizarán 3 casos.
- e) Para todos los casos llevaremos el módulo a una velocidad de 1700 rpm, para acercarnos a la nominal.

- f) Una vez al alcanzado los 50 segundos desde que conectamos la carga resistiva, se aumentará la apertura de válvulas para efectos de observar el comportamiento del módulo el mayor tiempo posible.

Tabla de variables de interés para cada caso

- Banco de inductancias conectado en estrella 0,8 henrios

Banco de inductancias 0,8 henrios					
Tiempo	Apertura de válvulas	Velocidad de rotación de la turbina hidroeléctrica con banco de inductancias en estrella	Par en el rotor de la turbina hidroeléctrica con banco de inductancias en estrella	Voltaje del circuito de excitación con banco de inductancias en estrella	Potencia mecánica en el eje del generador
Segundos	%	r/min	(N.m)	V	W

- Banco de inductancias conectado en estrella 1,6 y 0,8 henrios

Banco de inductancias 1,6 y 0,8 henrios					
Tiempo	Apertura de válvulas	Velocidad de rotación de la turbina hidroeléctrica con banco de inductancias en estrella	Par en el rotor de la turbina hidroeléctrica con banco de inductancias en estrella	Voltaje del circuito de excitación con banco de inductancias en estrella	Potencia mecánica en el eje del generador
Segundos	%	r/min	(N.m)	V	W

- Banco de inductancias conectado en estrella 3,2; 1,6 y 0,8 henrios

Banco de inductancias 3,2; 1,6 y 0,8 henrios

Tiempo	Apertura de válvulas	Velocidad de rotación de la turbina hidroeléctrica con banco de inductancias en estrella	Par en el rotor de la turbina hidroeléctrica con banco de inductancias en estrella	Voltaje del circuito de excitación con banco de inductancias en estrella	Potencia mecánica en el eje del generador
Segundos	%	r/min	(N.m)	V	W

OBJETIVOS

- Utilizar el módulo de banco de inductancias conectado en estrella, respectivamente permitiendo la evaluación del comportamiento de los parámetros como voltaje, par, velocidad y potencia mecánica.
- Evaluar los resultados obtenidos mediante teoría basada en leyes del comportamiento de circuitos eléctricos utilizando inductancias en diferentes tipos de configuraciones.
- Graficar los resultados de la variación de los parámetros de voltaje, par, velocidad y potencia con respecto al tiempo tomando en cuenta el efecto de la inductancia en sistemas eléctricos.

MATERIALES E INSUMOS

- Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes - LabVolt Serie 8960F-32.
- Software LVDAC-EMS función Emulador de Turbina hidroeléctrica.
- Fuente de alimentación 8525-20
- Módulo de cargas inductivas 8321-06
- Alternador sincrónico 8241
- Multímetro
- Cables tipo banana

PROCEDIMIENTO		
N°	ACTIVIDADES	OBSERVACIONES
1	Colocar los Módulos necesarios en el armario de LabVolt, se debe colocar de izquierda a derecha en el primer renglón de abajo, la fuente de alimentación, seguido del dinamómetro, el alternador síncrono y finalmente el banco de inductancias.	
2	Realizar la conexión en bornes en tipo estrella y alimentar en DC a la excitatriz.	
3	Conectar el multímetro para realizar la medición de tensión en bornes del alternador.	Cerciorarse de que se esté midiendo en AC.
4	Conectar un multímetro en bornes del circuito de excitación.	
5	Conectar el módulo de banco de inductancias en estrella con el alternador síncrono.	
6	Conectar el cable de adquisición de datos en la PC del laboratorio.	
7	Conectar el cable de alimentación del dinamómetro al mismo y luego a tomacorriente.	
8	Encender el dinamómetro y ejecutar el software LVSIM en el PC.	La opción a elegir en el software es de 120 V de alimentación y 60 Hz
9	Configurar al módulo en opción de dinamómetro y seleccionar el software en modo turbina hidroeléctrica Francis 300 w.	
10	Colocar los parámetros correspondientes en el apartado de turbina hidroeléctrica.	Parámetros iniciales: 0,30 $kg * m^2$, velocidad máxima de apertura de alabes: 10 (%/s) y relación de polea 24:24.

11	Desplegar la tabla de datos en el software y registrar los parámetros de interés (velocidad, par, potencia y apertura de álabes)	
12	Desplazar hacia arriba el deslizador hasta obtener n% de apertura de álabes para romper la inercia del rodete y disminuir el valor % para alcanzar la estabilidad del sistema.	Con el 29% de apertura de válvulas, se puede romper la inercia, pero se debe controlar disminuyendo de forma inmediata y controlada.
13	Se debe llevar el módulo a 1700 rpm, mediante el control de la apertura de válvulas.	Esto se debería lograr con el 15,5% de apertura.
14	Tratar de mantener estos rpm estables antes de activar el banco de inductancias.	
15	En la tabla de datos desplegada, se configura el temporizador para que tome datos automáticamente cada segundo.	
16	Registrar los valores velocidad, par, potencia y apertura de álabes.	Verificar que efectivamente se guarden los datos cada segundo.
17	Activar las inductancias de 0,8 henrios para las 3 líneas del módulo.	Se debe hacer de forma rápida, para evitar desbalance entre las fases del módulo.
18	A los 50 segundos, se variará el porcentaje de apertura de la válvula a 17,9%.	Se hace de esta manera para efectos de la práctica, de forma que se observen mejor los efectos de la carga inductiva.
19	Continuar con la toma de datos hasta que sean lo suficientes para un análisis adecuado.	
20	Proceder a dar parada al dinamómetro, y demás equipos en el laboratorio.	
21	Repetir los pasos 8 al 16 de forma ordenada.	

22	Activar las inductancias de 1,6 y 0,8 henrios para las 3 líneas del módulo.	Se debe hacer de forma rápida, para evitar desbalance entre las fases del módulo.
23	A los 50 segundos, se variará el porcentaje de apertura de la válvula a 17,9%.	Se hace de esta manera para efectos de la práctica, de forma que se observen mejor los efectos de la carga inductiva.
24	Continuar con la toma de datos hasta que sean lo suficientes para un análisis adecuado.	
25	Repetir los pasos 8 al 16 de forma ordenada.	
26	Activar las inductancias de 3,2; 1,6 y 0,8 henrios para las 3 líneas del módulo.	Se debe hacer de forma rápida, para evitar desbalanceo entre las fases del módulo.
27	A los 50 segundos, se variará el porcentaje de apertura de la válvula a 17,9%.	Se hace de esta manera para efectos de la práctica, de forma que se observen mejor los efectos de la carga inductiva.
28	Continuar con la toma de datos hasta que sean lo suficientes para un análisis adecuado.	
29	Proceder a dar parada al dinamómetro, y demás equipos en el laboratorio.	
30	Desconectar los equipos utilizados de forma ordenada.	Verificar que efectivamente todo este apagado para desconectar y maniobrar con seguridad.

CUADRO DE RESULTADOS

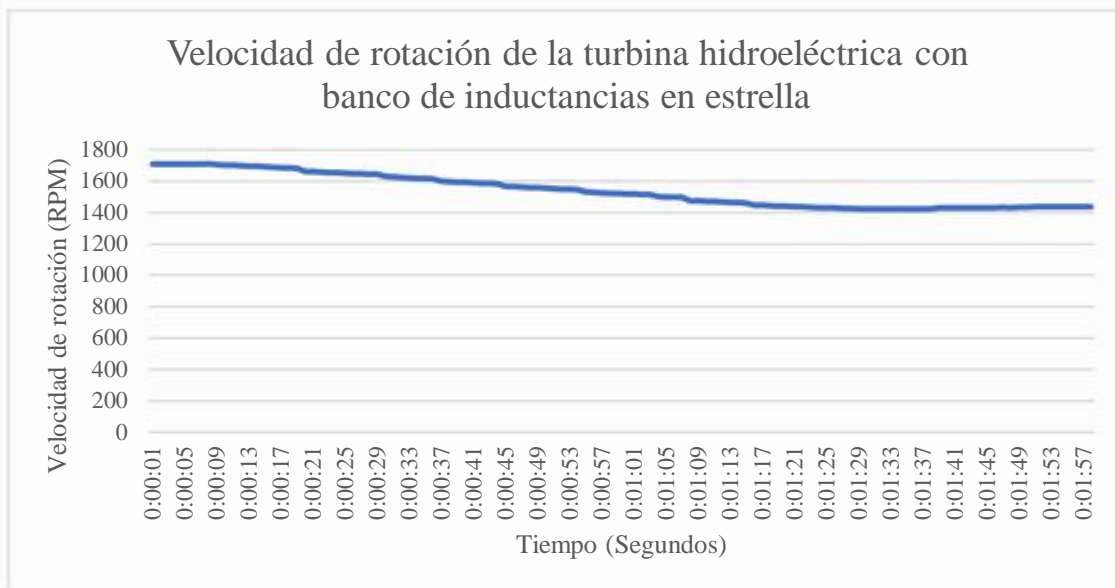
- Banco de inductancias conectado en estrella 0,8 henrios

Banco de inductancias 0,8 henrios					
Tiempo	Apertura de Álabes	Velocidad de rotación de la turbina hidroeléctrica con banco de inductancias en estrella	Par en el rotor de la turbina hidroeléctrica con banco de inductancias en estrella	Voltaje del circuito de excitación con banco de inductancias en estrella	Potencia mecánica en el eje del generador
Segundos	%	r/min	(N.m)	V	W
0:00:01	15,5	1707	0,071	190	12,64
0:00:02	15,5	1708	0,07	190	12,57
0:00:03	15,5	1708	0,071	190	12,61
0:00:04	15,5	1708	0,071	178	12,68
0:00:05	15,5	1708	0,071	178	12,65
0:00:06	15,5	1709	0,071	178	12,65
0:00:07	15,5	1709	0,071	169	12,78
0:00:08	15,5	1710	0,08	159	14,25
0:00:09	15,5	1704	0,142	156	25,34
0:00:10	15,5	1701	0,172	150	30,64
0:00:11	15,5	1700	0,17	143	30,21
0:00:12	15,5	1698	0,172	140	30,55
0:00:13	15,5	1696	0,169	139	30,02
0:00:14	15,5	1694	0,17	139	30,14
0:00:15	15,5	1691	0,17	139	30,1
0:00:16	15,5	1689	0,168	139	29,75
0:00:17	15,5	1686	0,167	138	29,45
0:00:18	15,5	1683	0,168	138	29,52
0:00:19	15,5	1680	0,169	138	29,77
0:00:20	15,5	1662	0,168	136	29,29
0:00:21	15,5	1659	0,169	136	29,31
0:00:22	15,5	1657	0,167	136	29,05
0:00:23	15,5	1655	0,17	136	29,39
0:00:24	15,5	1653	0,169	136	29,18
0:00:25	15,5	1651	0,169	135	29,27
0:00:26	15,5	1648	0,169	135	29,13
0:00:27	15,5	1646	0,168	135	28,98
0:00:28	15,5	1644	0,169	135	29,13
0:00:29	15,5	1642	0,17	134	29,3
0:00:30	15,5	1630	0,17	134	29,1
0:00:31	15,5	1626	0,169	133	28,83
0:00:32	15,5	1623	0,169	133	28,69

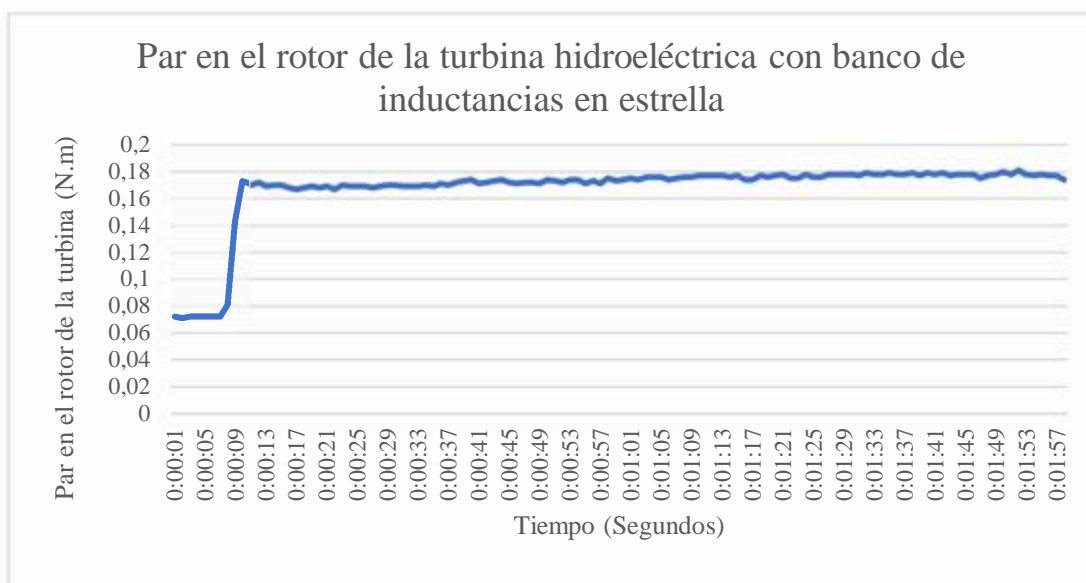
0:00:33	15,5	1621	0,169	133	28,6
0:00:34	15,5	1618	0,17	132	28,79
0:00:35	15,5	1616	0,169	132	28,55
0:00:36	15,5	1613	0,171	132	28,87
0:00:37	15,5	1598	0,17	131	28,53
0:00:38	15,5	1596	0,172	131	28,71
0:00:39	15,5	1593	0,173	131	28,83
0:00:40	15,5	1592	0,174	130	29,01
0:00:41	15,5	1589	0,171	130	28,49
0:00:42	15,5	1587	0,172	130	28,53
0:00:43	15,5	1585	0,173	130	28,66
0:00:44	15,5	1584	0,174	130	28,86
0:00:45	15,5	1567	0,172	128	28,24
0:00:46	15,5	1565	0,171	128	28,09
0:00:47	15,5	1562	0,172	128	28,07
0:00:48	15,5	1560	0,172	128	28,13
0:00:49	15,5	1558	0,171	128	27,92
0:00:50	15,5	1554	0,174	127	28,25
0:00:51	15,5	1552	0,173	127	28,15
0:00:52	15,5	1550	0,172	127	27,89
0:00:53	15,5	1548	0,174	127	28,14
0:00:54	15,5	1546	0,174	126	28,11
0:00:55	15,5	1530	0,171	125	27,46
0:00:56	15,5	1527	0,173	125	27,73
0:00:57	15,5	1525	0,171	125	27,37
0:00:58	15,5	1523	0,175	124	27,96
0:00:59	15,5	1521	0,173	124	27,59
0:01:00	15,5	1519	0,174	124	27,65
0:01:01	15,5	1517	0,175	124	27,77
0:01:02	15,5	1515	0,174	124	27,64
0:01:03	15,5	1513	0,176	124	27,84
0:01:04	15,5	1500	0,176	123	27,66
0:01:05	15,5	1499	0,176	122	27,6
0:01:06	15,5	1497	0,174	122	27,34
0:01:07	15,5	1496	0,175	122	27,48
0:01:08	15,5	1475	0,176	120	27,22
0:01:09	15,5	1473	0,176	120	27,18
0:01:10	15,5	1471	0,177	120	27,23
0:01:11	15,5	1469	0,177	119	27,23
0:01:12	15,5	1467	0,177	119	27,16
0:01:13	15,5	1465	0,177	119	27,09
0:01:14	15,5	1463	0,176	119	26,96
0:01:15	15,5	1461	0,177	119	27,02
0:01:16	15,5	1447	0,174	118	26,37
0:01:17	15,5	1445	0,174	118	26,34
0:01:18	15,5	1443	0,177	118	26,72

0:01:19	15,5	1441	0,176	118	26,51
0:01:20	15,5	1439	0,177	117	26,66
0:01:21	15,5	1438	0,178	117	26,76
0:01:22	15,5	1435	0,175	117	26,36
0:01:23	15,5	1433	0,175	117	26,31
0:01:24	15,5	1431	0,178	117	26,64
0:01:25	15,5	1430	0,176	117	26,39
0:01:26	15,7	1428	0,176	117	26,35
0:01:27	15,9	1427	0,178	116	26,57
0:01:28	16,2	1425	0,178	116	26,61
0:01:29	16,4	1424	0,178	116	26,6
0:01:30	16,6	1424	0,178	116	26,48
0:01:31	16,8	1423	0,177	116	26,35
0:01:32	16,9	1422	0,179	116	26,66
0:01:33	17,4	1423	0,178	116	26,58
0:01:34	17,5	1423	0,178	116	26,57
0:01:35	17,8	1422	0,179	116	26,66
0:01:36	17,9	1422	0,178	116	26,48
0:01:37	17,9	1423	0,178	116	26,58
0:01:38	17,9	1423	0,179	116	26,69
0:01:39	17,9	1430	0,177	117	26,54
0:01:40	17,9	1430	0,179	117	26,88
0:01:41	17,9	1430	0,178	117	26,66
0:01:42	17,9	1431	0,179	117	26,79
0:01:43	17,9	1431	0,177	117	26,57
0:01:44	17,9	1431	0,178	117	26,66
0:01:45	17,9	1431	0,178	117	26,61
0:01:46	17,9	1431	0,178	117	26,64
0:01:47	17,9	1432	0,175	117	26,26
0:01:48	17,9	1431	0,177	117	26,58
0:01:49	17,9	1433	0,178	117	26,7
0:01:50	17,9	1434	0,18	117	27,05
0:01:51	17,9	1435	0,178	117	26,7
0:01:52	17,9	1435	0,181	117	27,2
0:01:53	17,9	1435	0,178	117	26,76
0:01:54	17,9	1437	0,177	117	26,62
0:01:55	17,9	1436	0,178	117	26,74
0:01:56	17,9	1437	0,177	117	26,62
0:01:57	17,9	1438	0,177	117	26,64
0:01:58	17,9	1437	0,174	117	26,23

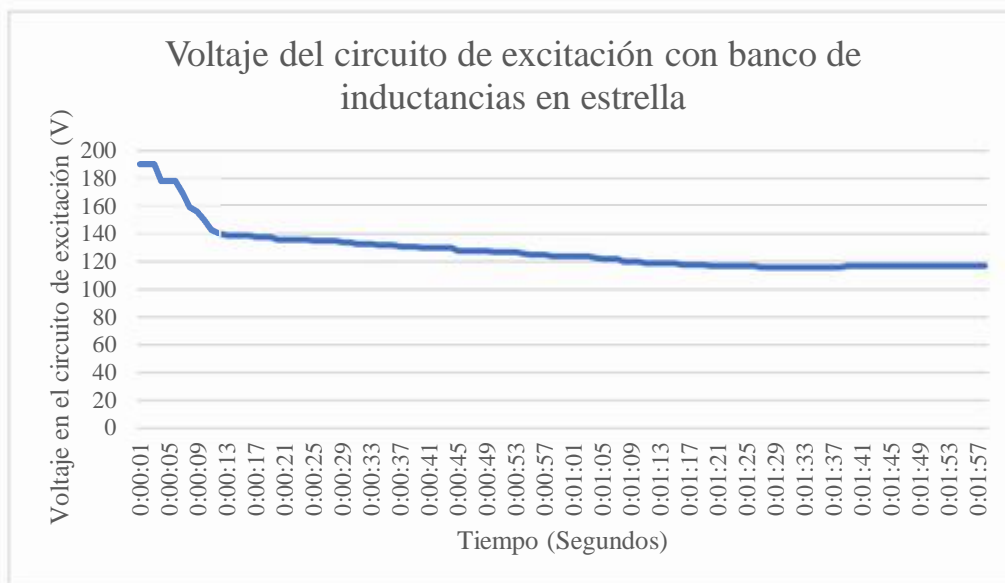
Resultados de velocidad de rotación de la turbina hidroeléctrica con respecto al tiempo



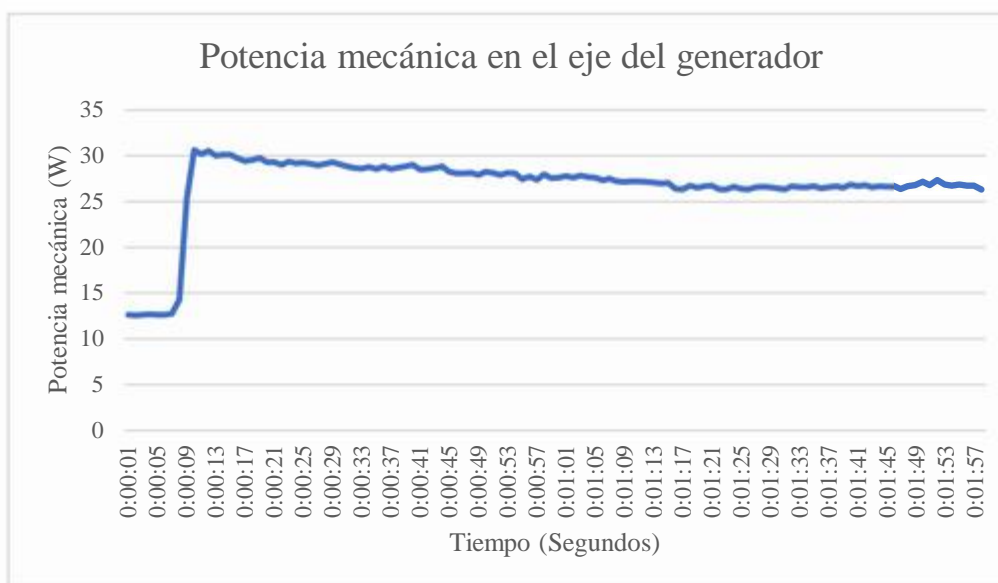
Resultados de par en el rotor de la turbina hidroeléctrica con respecto al tiempo



Resultados de voltaje del circuito de excitación con respecto al tiempo



Resultados de potencia mecánica en el eje del generador con respecto al tiempo



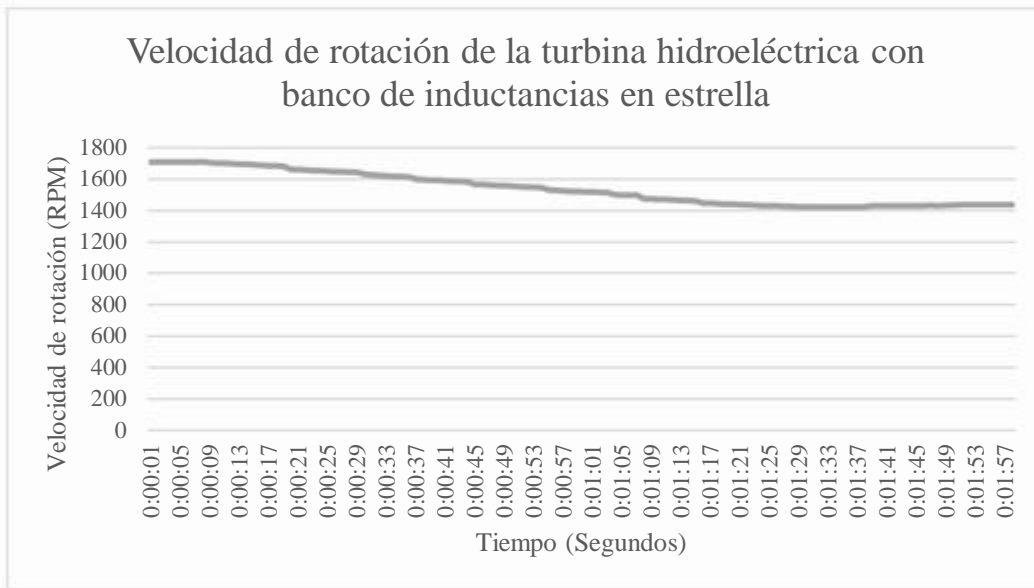
- Banco de inductancias conectado en estrella 1,6 y 0,8 henrios

Banco de inductancias 1,6 y 0,8 henrios					
Tiempo	Apertura de Álabes	Velocidad de rotación de la turbina hidroeléctrica con banco de inductancias en estrella	Par en el rotor de la turbina hidroeléctrica con banco de inductancias en estrella	Voltaje del circuito de excitación con banco de inductancias en estrella	Potencia mecánica en el eje del generador
Segundos	%	r/min	(N.m)	V	W
0:00:01	15,5	1707	0,071	190	12,64
0:00:02	15,5	1708	0,07	190	12,57
0:00:03	15,5	1708	0,071	190	12,61
0:00:04	15,5	1708	0,071	178	12,68
0:00:05	15,5	1708	0,071	178	12,65
0:00:06	15,5	1709	0,071	178	12,65
0:00:07	15,5	1709	0,071	169	12,78
0:00:08	15,5	1710	0,08	159	14,25
0:00:09	15,5	1704	0,142	156	25,34
0:00:10	15,5	1701	0,172	150	30,64
0:00:11	15,5	1700	0,17	143	30,21
0:00:12	15,5	1698	0,172	140	30,55
0:00:13	15,5	1696	0,169	139	30,02
0:00:14	15,5	1694	0,17	139	30,14
0:00:15	15,5	1691	0,17	139	30,1
0:00:16	15,5	1689	0,168	139	29,75
0:00:17	15,5	1686	0,167	138	29,45
0:00:18	15,5	1683	0,168	138	29,52
0:00:19	15,5	1680	0,169	138	29,77
0:00:20	15,5	1662	0,168	136	29,29
0:00:21	15,5	1659	0,169	136	29,31
0:00:22	15,5	1657	0,167	136	29,05
0:00:23	15,5	1655	0,17	136	29,39
0:00:24	15,5	1653	0,169	136	29,18
0:00:25	15,5	1651	0,169	135	29,27
0:00:26	15,5	1648	0,169	135	29,13
0:00:27	15,5	1646	0,168	135	28,98
0:00:28	15,5	1644	0,169	135	29,13
0:00:29	15,5	1642	0,17	134	29,3
0:00:30	15,5	1630	0,17	134	29,1
0:00:31	15,5	1626	0,169	133	28,83
0:00:32	15,5	1623	0,169	133	28,69
0:00:33	15,5	1621	0,169	133	28,6

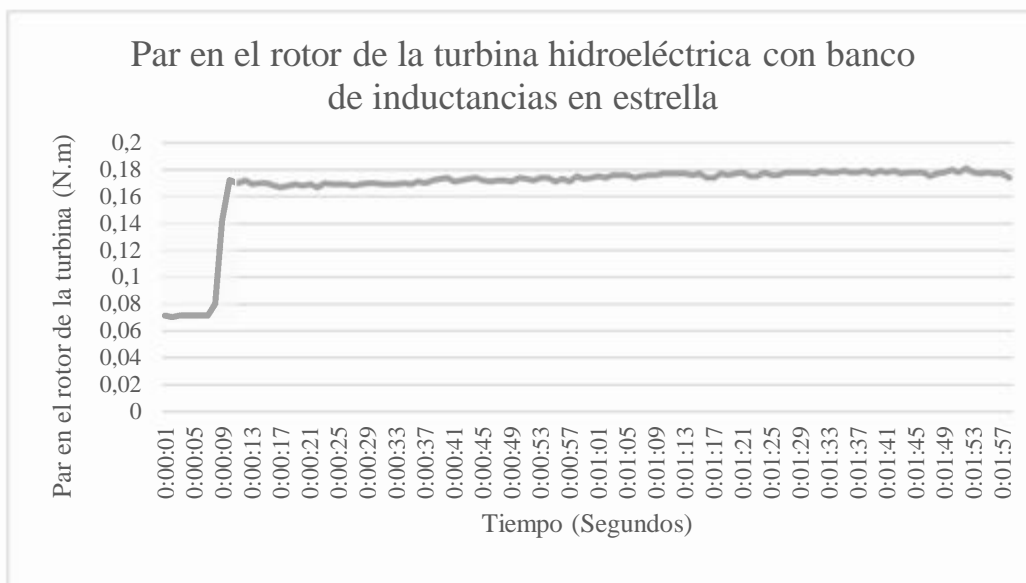
0:00:34	15,5	1618	0,17	132	28,79
0:00:35	15,5	1616	0,169	132	28,55
0:00:36	15,5	1613	0,171	132	28,87
0:00:37	15,5	1598	0,17	131	28,53
0:00:38	15,5	1596	0,172	131	28,71
0:00:39	15,5	1593	0,173	131	28,83
0:00:40	15,5	1592	0,174	130	29,01
0:00:41	15,5	1589	0,171	130	28,49
0:00:42	15,5	1587	0,172	130	28,53
0:00:43	15,5	1585	0,173	130	28,66
0:00:44	15,5	1584	0,174	130	28,86
0:00:45	15,5	1567	0,172	128	28,24
0:00:46	15,5	1565	0,171	128	28,09
0:00:47	15,5	1562	0,172	128	28,07
0:00:48	15,5	1560	0,172	128	28,13
0:00:49	15,5	1558	0,171	128	27,92
0:00:50	15,5	1554	0,174	127	28,25
0:00:51	15,5	1552	0,173	127	28,15
0:00:52	15,5	1550	0,172	127	27,89
0:00:53	15,5	1548	0,174	127	28,14
0:00:54	15,5	1546	0,174	126	28,11
0:00:55	15,5	1530	0,171	125	27,46
0:00:56	15,5	1527	0,173	125	27,73
0:00:57	15,5	1525	0,171	125	27,37
0:00:58	15,5	1523	0,175	124	27,96
0:00:59	15,5	1521	0,173	124	27,59
0:01:00	15,5	1519	0,174	124	27,65
0:01:01	15,5	1517	0,175	124	27,77
0:01:02	15,5	1515	0,174	124	27,64
0:01:03	15,5	1513	0,176	124	27,84
0:01:04	15,5	1500	0,176	123	27,66
0:01:05	15,5	1499	0,176	122	27,6
0:01:06	15,5	1497	0,174	122	27,34
0:01:07	15,5	1496	0,175	122	27,48
0:01:08	15,5	1475	0,176	120	27,22
0:01:09	15,5	1473	0,176	120	27,18
0:01:10	15,5	1471	0,177	120	27,23
0:01:11	15,5	1469	0,177	119	27,23
0:01:12	15,5	1467	0,177	119	27,16
0:01:13	15,5	1465	0,177	119	27,09
0:01:14	15,5	1463	0,176	119	26,96
0:01:15	15,5	1461	0,177	119	27,02
0:01:16	15,5	1447	0,174	118	26,37
0:01:17	15,5	1445	0,174	118	26,34
0:01:18	15,5	1443	0,177	118	26,72
0:01:19	15,5	1441	0,176	118	26,51

0:01:20	15,5	1439	0,177	117	26,66
0:01:21	15,5	1438	0,178	117	26,76
0:01:22	15,5	1435	0,175	117	26,36
0:01:23	15,5	1433	0,175	117	26,31
0:01:24	15,5	1431	0,178	117	26,64
0:01:25	15,5	1430	0,176	117	26,39
0:01:26	15,7	1428	0,176	117	26,35
0:01:27	15,9	1427	0,178	116	26,57
0:01:28	16,2	1425	0,178	116	26,61
0:01:29	16,4	1424	0,178	116	26,6
0:01:30	16,6	1424	0,178	116	26,48
0:01:31	16,8	1423	0,177	116	26,35
0:01:32	16,9	1422	0,179	116	26,66
0:01:33	17,4	1423	0,178	116	26,58
0:01:34	17,5	1423	0,178	116	26,57
0:01:35	17,8	1422	0,179	116	26,66
0:01:36	17,9	1422	0,178	116	26,48
0:01:37	17,9	1423	0,178	116	26,58
0:01:38	17,9	1423	0,179	116	26,69
0:01:39	17,9	1430	0,177	117	26,54
0:01:40	17,9	1430	0,179	117	26,88
0:01:41	17,9	1430	0,178	117	26,66
0:01:42	17,9	1431	0,179	117	26,79
0:01:43	17,9	1431	0,177	117	26,57
0:01:44	17,9	1431	0,178	117	26,66
0:01:45	17,9	1431	0,178	117	26,61
0:01:46	17,9	1431	0,178	117	26,64
0:01:47	17,9	1432	0,175	117	26,26
0:01:48	17,9	1431	0,177	117	26,58
0:01:49	17,9	1433	0,178	117	26,7
0:01:50	17,9	1434	0,18	117	27,05
0:01:51	17,9	1435	0,178	117	26,7
0:01:52	17,9	1435	0,181	117	27,2
0:01:53	17,9	1435	0,178	117	26,76
0:01:54	17,9	1437	0,177	117	26,62
0:01:55	17,9	1436	0,178	117	26,74
0:01:56	17,9	1437	0,177	117	26,62
0:01:57	17,9	1438	0,177	117	26,64
0:01:58	17,9	1437	0,174	117	26,23

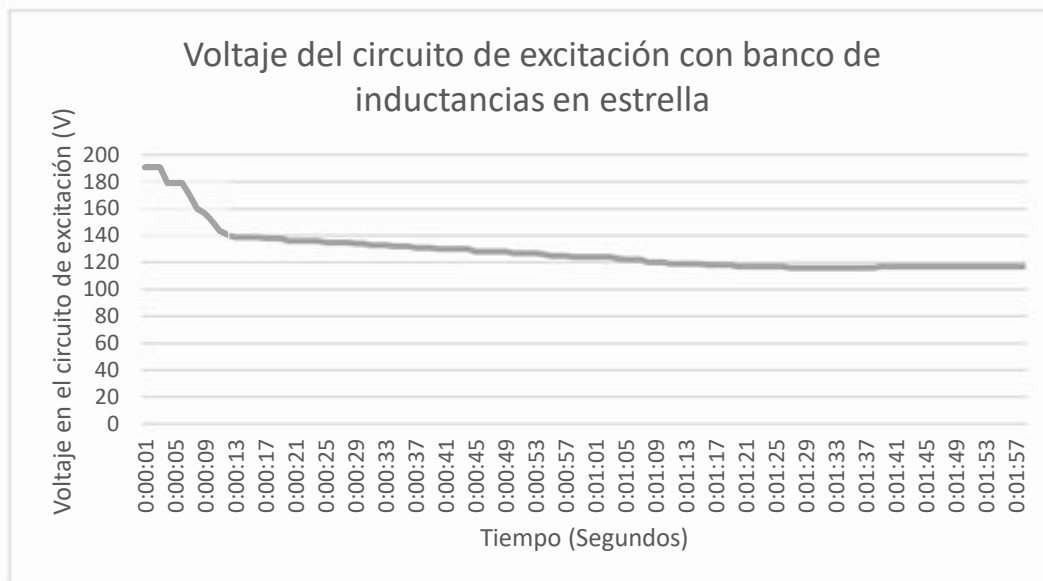
Resultados de velocidad de rotación de la turbina hidroeléctrica con respecto al tiempo



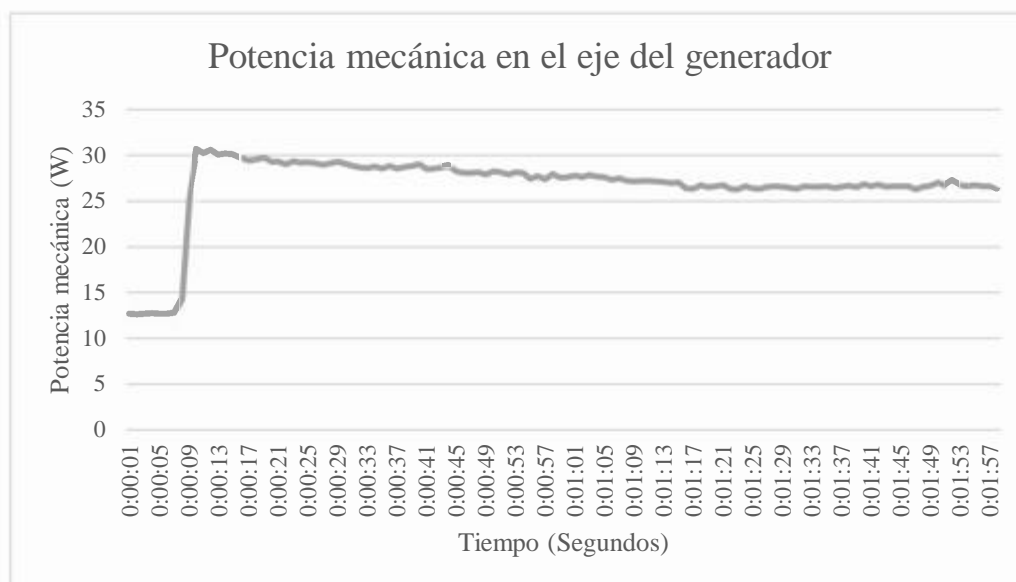
Resultados de par en el rotor de la turbina hidroeléctrica con respecto al tiempo



Resultados de voltaje del circuito de excitación con respecto al tiempo



Resultados de potencia mecánica en el eje del generador con respecto al tiempo



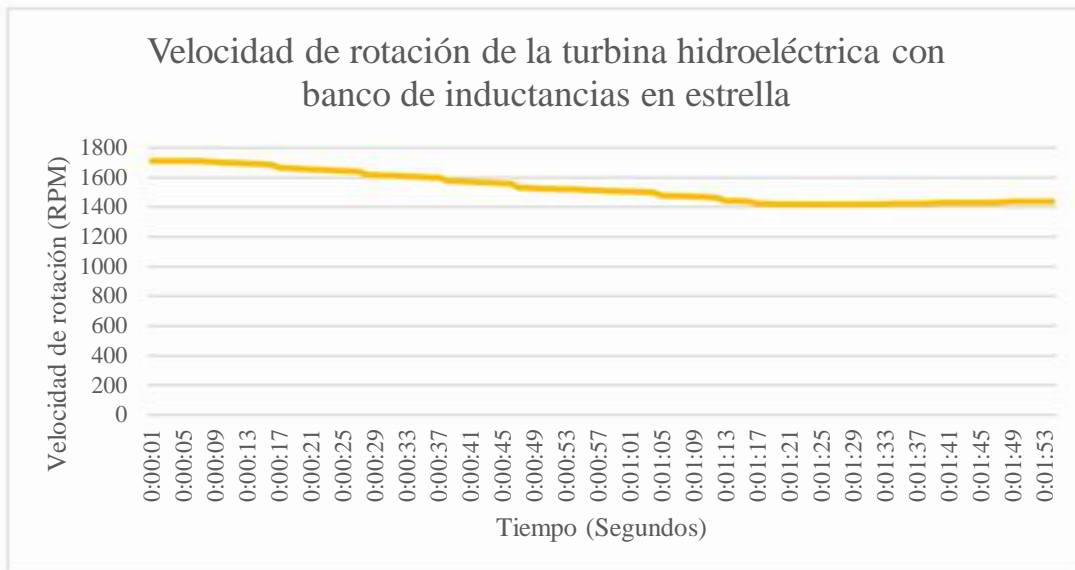
- Banco de inductancias conectado en estrella 3,2; 1,6 y 0,8 henrios

Banco de inductancias 3,2; 1,6 y 0,8 henrios					
Tiempo	Apertura de Álabes	Velocidad de rotación de la turbina hidroeléctrica con banco de inductancias en estrella	Par en el rotor de la turbina hidroeléctrica con banco de inductancias en estrella	Voltaje del circuito de excitación con banco de inductancias en estrella	Potencia mecánica en el eje del generador
Segundos	%	r/min	(N.m)	V	W
0:00:01	15,5	1709	0,065	189	11,58
0:00:02	15,5	1709	0,067	186	11,9
0:00:03	15,5	1709	0,066	175	11,87
0:00:04	15,5	1710	0,067	170	11,94
0:00:05	15,5	1711	0,065	166	11,72
0:00:06	15,5	1710	0,069	156	12,34
0:00:07	15,5	1709	0,114	157	20,38
0:00:08	15,5	1705	0,149	146	26,66
0:00:09	15,5	1703	0,159	133	28,27
0:00:10	15,5	1701	0,173	132	30,78
0:00:11	15,5	1698	0,173	132	30,82
0:00:12	15,5	1696	0,174	132	30,92
0:00:13	15,5	1693	0,171	132	30,32
0:00:14	15,5	1691	0,172	131	30,55
0:00:15	15,5	1688	0,174	131	30,74
0:00:16	15,5	1685	0,173	131	30,53
0:00:17	15,5	1664	0,171	129	29,88
0:00:18	15,5	1662	0,172	129	29,92
0:00:19	15,5	1659	0,171	128	29,76
0:00:20	15,5	1657	0,17	128	29,55
0:00:21	15,5	1654	0,173	128	29,95
0:00:22	15,5	1651	0,172	128	29,67
0:00:23	15,5	1649	0,172	128	29,79
0:00:24	15,5	1646	0,171	128	29,49
0:00:25	15,5	1643	0,171	128	29,37
0:00:26	15,5	1641	0,174	127	29,87
0:00:27	15,5	1638	0,172	127	29,43
0:00:28	15,5	1618	0,171	125	28,92
0:00:29	15,5	1616	0,172	125	29,12
0:00:30	15,5	1614	0,172	125	29,14
0:00:31	15,5	1612	0,171	125	28,95
0:00:32	15,5	1610	0,169	125	28,56
0:00:33	15,5	1607	0,171	125	28,74
0:00:34	15,5	1605	0,173	124	29,03

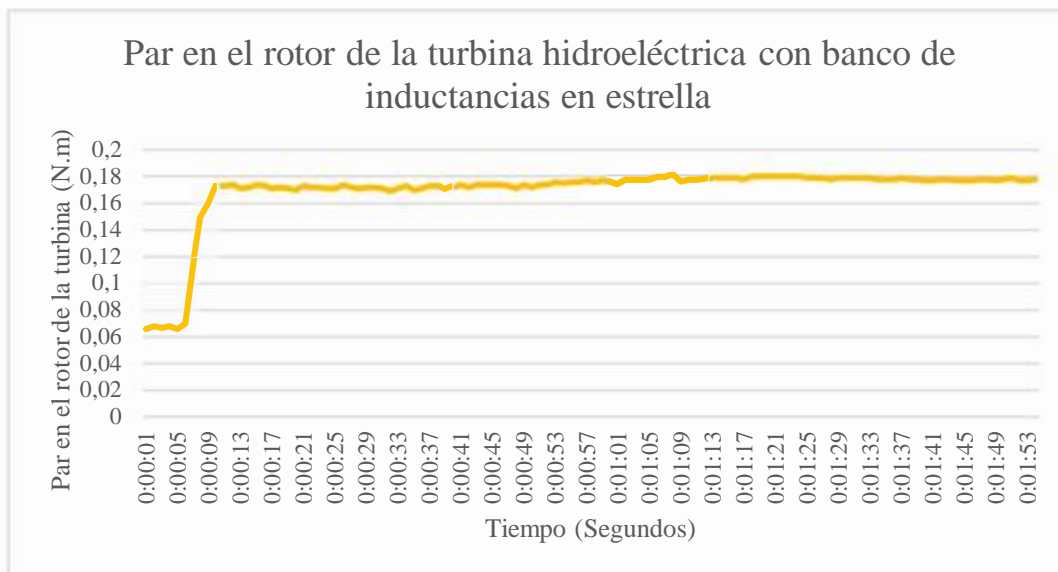
0:00:35	15,5	1603	0,17	124	28,59
0:00:36	15,5	1600	0,171	124	28,58
0:00:37	15,5	1598	0,173	124	28,97
0:00:38	15,5	1577	0,173	122	28,62
0:00:39	15,5	1575	0,17	122	28,12
0:00:40	15,5	1572	0,172	122	28,3
0:00:41	15,5	1570	0,174	122	28,53
0:00:42	15,5	1567	0,172	121	28,22
0:00:43	15,5	1565	0,174	121	28,53
0:00:44	15,5	1563	0,174	121	28,5
0:00:45	15,5	1561	0,174	121	28,44
0:00:46	15,5	1559	0,174	121	28,47
0:00:47	15,5	1531	0,173	119	27,67
0:00:48	15,5	1529	0,171	118	27,38
0:00:49	15,5	1527	0,174	118	27,84
0:00:50	15,5	1525	0,172	118	27,52
0:00:51	15,5	1523	0,174	118	27,7
0:00:52	15,5	1521	0,174	118	27,75
0:00:53	15,5	1519	0,176	118	27,92
0:00:54	15,5	1518	0,175	118	27,87
0:00:55	15,5	1515	0,176	117	27,94
0:00:56	15,5	1513	0,176	117	27,93
0:00:57	15,5	1512	0,177	117	27,98
0:00:58	15,5	1510	0,176	117	27,81
0:00:59	15,5	1508	0,177	117	27,89
0:01:00	15,5	1506	0,176	117	27,82
0:01:01	15,5	1504	0,174	117	27,34
0:01:02	15,5	1502	0,177	116	27,84
0:01:03	15,5	1501	0,177	116	27,84
0:01:04	15,5	1499	0,177	116	27,78
0:01:05	15,5	1477	0,177	114	27,45
0:01:06	15,5	1475	0,179	114	27,62
0:01:07	15,5	1474	0,179	114	27,57
0:01:08	15,5	1472	0,181	114	27,82
0:01:09	15,5	1470	0,176	114	27,17
0:01:10	15,5	1468	0,177	114	27,21
0:01:11	15,5	1466	0,177	113	27,22
0:01:12	15,5	1464	0,178	113	27,24
0:01:13	15,5	1442	0,179	111	27,05
0:01:14	15,5	1440	0,179	111	27,07
0:01:15	15,5	1439	0,179	111	27
0:01:16	15,5	1437	0,179	111	26,88
0:01:17	15,7	1422	0,178	110	26,49
0:01:18	16,2	1421	0,18	110	26,74
0:01:19	16,7	1420	0,18	109	26,71
0:01:20	17,1	1419	0,18	109	26,78

0:01:21	17,4	1418	0,18	109	26,76
0:01:22	17,7	1419	0,18	110	26,69
0:01:23	17,7	1419	0,18	110	26,7
0:01:24	17,8	1418	0,18	109	26,76
0:01:25	17,9	1418	0,179	109	26,62
0:01:26	17,9	1419	0,179	110	26,66
0:01:27	17,9	1418	0,179	109	26,62
0:01:28	17,9	1418	0,178	109	26,49
0:01:29	17,9	1419	0,179	110	26,66
0:01:30	17,9	1418	0,179	109	26,55
0:01:31	17,9	1419	0,179	110	26,54
0:01:32	17,9	1420	0,179	109	26,69
0:01:33	17,9	1420	0,179	109	26,57
0:01:34	17,9	1421	0,178	110	26,53
0:01:35	17,9	1422	0,178	109	26,57
0:01:36	17,9	1422	0,178	109	26,58
0:01:37	17,9	1423	0,179	110	26,75
0:01:38	17,9	1424	0,178	110	26,48
0:01:39	17,9	1428	0,178	110	26,66
0:01:40	17,9	1429	0,177	110	26,53
0:01:41	17,9	1429	0,177	110	26,44
0:01:42	17,9	1429	0,178	110	26,7
0:01:43	17,9	1429	0,178	110	26,7
0:01:44	17,9	1431	0,177	110	26,55
0:01:45	17,9	1430	0,177	110	26,57
0:01:46	17,9	1431	0,177	111	26,48
0:01:47	17,9	1431	0,178	110	26,7
0:01:48	17,9	1432	0,178	111	26,66
0:01:49	17,9	1437	0,177	111	26,68
0:01:50	17,9	1436	0,178	111	26,77
0:01:51	17,9	1437	0,179	111	26,89
0:01:52	17,9	1438	0,177	111	26,68
0:01:53	17,9	1438	0,177	111	26,68
0:01:54	17,9	1438	0,178	111	26,76

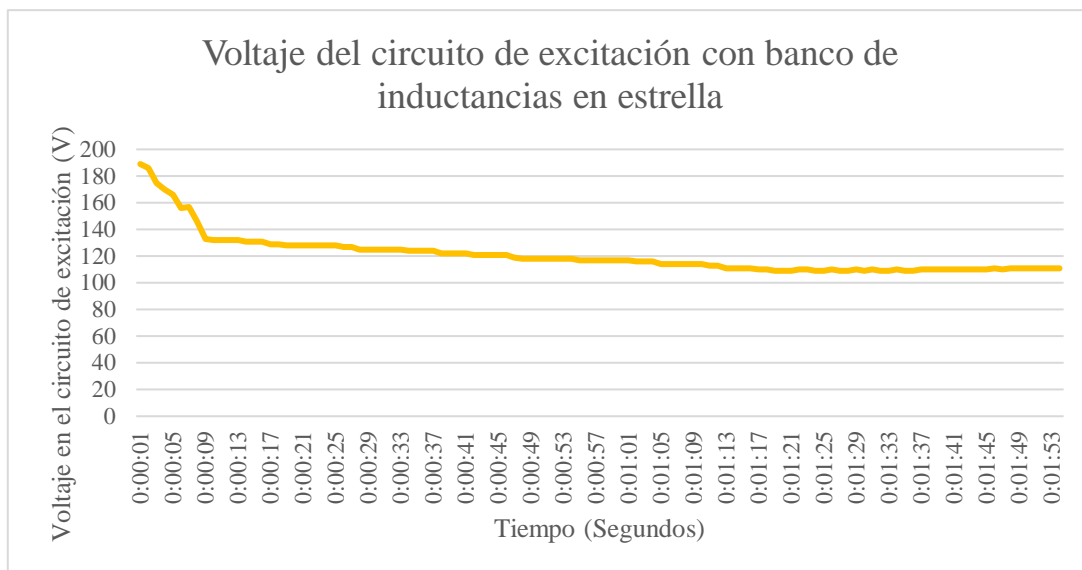
Resultados de velocidad de rotación de la turbina hidroeléctrica con respecto al tiempo



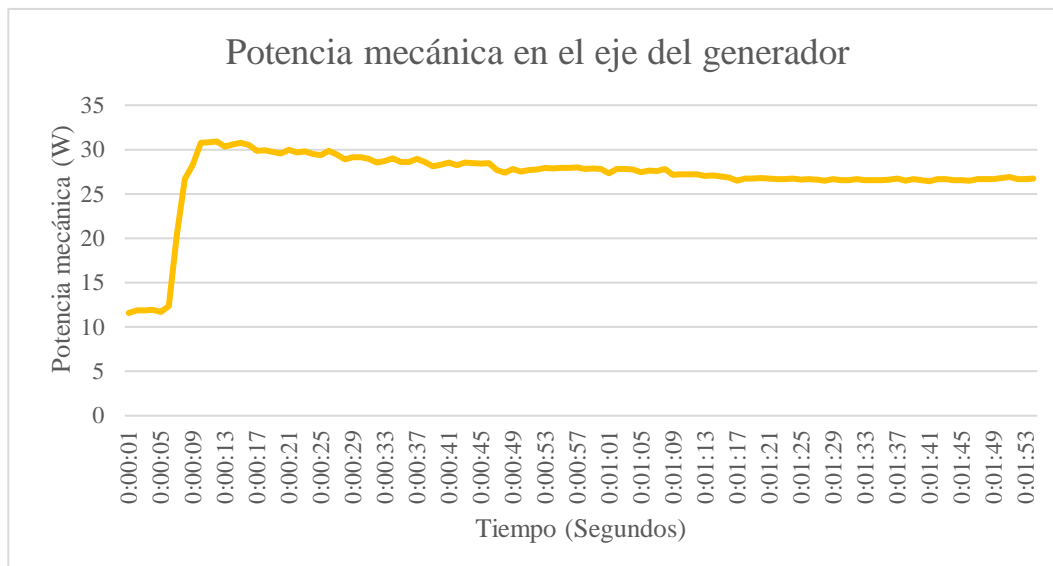
Resultados de par en el rotor de la turbina hidroeléctrica con respecto al tiempo



Resultados de voltaje del circuito de excitación con respecto al tiempo



Resultados de potencia mecánica en el eje del generador con respecto al tiempo



CONCLUSIONES

- Podemos concluir que, en los tres casos de estudio propuestos para observar el efecto de las cargas inductivas, tenemos resultados similares. Al momento de incluir cargas inductivas la corriente del generador aumenta, por lo tanto, crea una caída de tensión en la resistencia del estator y un aumento instantáneo de la reactancia síncrona.
- A la vez, la tensión del generador se ve afectada, disminuyendo por los parámetros anteriores, sin embargo, la tensión no tiene una afectación drástica como en el caso de las cargas resistivas. Por otro lado, la potencia activa tiene un comportamiento similar al descrito a la tensión.
- En el momento de conectar las cargas, se genera un aumento de la potencia activa, esta se opone al par mecánico de la maquina en ese momento, generando una disminución leve e instantánea. Mediante el efecto de la inercia el par del generador se reduce ligeramente y la velocidad tiende a ser constante.
- La potencia mecánica, disminuye ligeramente cuando se conecta una carga inductiva. En definitiva, cuando se conecta una carga inductiva al sistema, la velocidad de rotación aumenta, por lo tanto, la tensión, la corriente y la potencia activa aumenta ligeramente, no obstante, luego de eso, tienden a disminuir estos parámetros de forma controlada hasta un rango de 1500-1400 rpm, es decir que no tiene un efecto tan drástico como si se incluyeran resistencias puras, esto debido a las características propias de las inductancias.

BIBLIOGRAFÍA

Chapman, S. J., Rodríguez Pérez, C., & Santana Díaz Alfredo. (2012). *Máquinas eléctricas* (5a ed). McGraw-Hill Interamericana.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102497>

Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill.

Umar, B. M., Huang, X., & Wang, Z. (23 de 08 de 2024). MPID. Obtenido de Experimental Flow Performance Investigation of Francis Turbines from Model to Prototype:

<https://www.mdpi.com/2076-3417/14/17/7461>

Wang, Ly., Zhang, Jj. & Fan, Hg. Optimization of closing law of turbine guide vanes based on improved artificial ecosystem algorithm. J Hydrodyn 35, 582–593 (2023).
<https://doi.org/10.1007/s42241-023-0034-y>

ANEXOS



Conexión de equipos e instrumentación para práctica de banco de inductancias

Fecha de Elaboración: 09/09/2024

Elaborado por: Bailón Cañarte Jesús Roberto

Flores Castro Guido Fernando

REVISADO POR:

Dr. Vladimir Jaramillo García

FECHA: 09/09/2024

TAREAS INTRA-CLASE: GUÍA TALLER/LABORATORIO

GUÍA DE PRÁCTICAS DE ASIGNATURA

INFORME

NOMBRE DE LA PRÁCTICA	Efecto de la variación de la inercia del rodete de una Turbina hidroeléctrica	No. PRÁCTICA: MTH - 04
--------------------------------------	--	--

DATOS INFORMATIVOS	
CARRERA:	Electricidad
CICLO/NIVEL:	Egresado
FECHA:	19/10/2024
NOMBRE DEL ESTUDIANTE:	Bailón Cañarte Jesús Roberto Flores Castro Guido Fernando
DOCENTE RESPONSABLE	Dr. Vladimir Jaramillo García

FUNDAMENTACIÓN
<ul style="list-style-type: none"> • Variación del caudal en una turbina hidroeléctrica • Conversión de energía mecánica a eléctrica • Voltaje generado en generador síncrono • Inercia de rodete de un generador síncrono • Respuesta inercial del generador síncrono <p style="text-align: center;">Variación del caudal en una turbina hidroeléctrica</p> <p>La apertura y cierre de los álabes directrices en una turbina hidroeléctrica controlan el caudal que pasa a través de la turbina, afectando la generación de energía y la estabilidad operativa. Los álabes se ajustan para optimizar la conversión de energía en función de la demanda eléctrica y las condiciones del sistema hidráulico. Según (Wang, Ly., Zhang, Jj. & Fan, Hg., 2023), la apertura de los álabes directrices regula no solo el caudal sino también el torque generado en la turbina, influenciando directamente la eficiencia hidráulica del sistema. A mayores aperturas, se incrementa el flujo y la velocidad de entrada del agua, mejorando el rendimiento.</p> <p style="text-align: center;">Conversión de energía mecánica a eléctrica</p> <p>La conversión de energía mecánica a eléctrica en las turbinas hidroeléctricas ocurre cuando el agua que pasa a través de la turbina mueve el rotor, generando energía mecánica. Esta energía se transfiere a un generador síncrono que convierte el movimiento rotacional en energía eléctrica mediante la interacción de los campos magnéticos del rotor y estator. Los avances en el</p>

diseño de generadores han permitido mejorar la eficiencia de esta conversión, alcanzando hasta el 95% en algunas instalaciones (Umar, Huang, & Wang, 2024).

Voltaje generado en generador síncrono

El voltaje interno generado en el estator depende de la velocidad de rotación del eje y del flujo magnético inducido sobre él, este flujo se genera por la corriente que pasa por el circuito de excitación del rotor, esto da lugar a que la tensión a la salida del generador síncrono sea igual a la tensión interna generada restando las respectivas caídas de tensión por efecto de la variación del flujo magnético en el entrehierro, efecto joule en el estator, autoinductancia y si el rotor es liso o de polos salientes (Chapman et al., 2012).

Inercia del rodete de un generador síncrono

La inercia del impulsor en un generador síncrono tiene un impacto significativo en su comportamiento dinámico, especialmente en la respuesta a cambios de carga y perturbaciones en el sistema eléctrico.

Alta inercia: El generador tendrá mayor capacidad para soportar perturbaciones en la red, como cambios bruscos de carga o fluctuaciones de frecuencia. Esto se debe a que los sistemas con mayor inercia tienden a desacelerar más lentamente cuando la carga aumenta repentinamente y a acelerar más lentamente cuando la carga disminuye. Esta estabilidad ayuda a mantener el generador sincronizado con la red.

Baja inercia: Los generadores son más sensibles a las perturbaciones, lo que significa cambios más rápidos y repentinos de velocidad y frecuencia. Esto puede hacer que sea más difícil mantenerse al día con la red, aumentando el riesgo de perder estabilidad.

Respuesta inercial del generador síncrono

La respuesta inercial de un generador síncrono es el comportamiento del generador que resiste cambios rápidos en la frecuencia del sistema eléctrico debido a su inercia mecánica. Esta respuesta es fundamental para la estabilidad de la red cuando se produce un desequilibrio entre la producción y la demanda de energía. Cuando se produce una perturbación en la red, como un corte repentino de energía o un aumento repentino de la carga, la frecuencia del sistema tiende a bajar debido al desequilibrio entre generación y demanda. En este punto, la masa giratoria del generador (el rotor y en algunos casos el impulsor) actúa como almacén de energía cinética. (Jiménez Muñoz, J., 2019).

Velocidad del generador síncrono

La velocidad de sincronismo en un sistema eléctrico depende de la frecuencia del sistema, en este caso, 60 Hz. Otra característica importante para la velocidad de rotación nominal es el número de polos que cuenta la máquina síncrona, dado que está inversamente relacionado con la velocidad nominal de rotación del generador síncrono. (Chapman et al., 2012).

La velocidad de rotación está descrita en la siguiente fórmula

$$n_s = \frac{120 * f}{P} \quad (1)$$

En donde:

n_s = Velocidad nominal de Rotación [RPM]

f = Frecuencia nominal del sistema [Hz]

P = Número de Polos

Tipo de turbina del emulador de hidroeléctrica a utilizar

- Turbina tipo Francis de 300 W

Consideraciones iniciales

- Se tomarán velocidades de rotación de control, la inicial será de 1700 rpm, para acercarnos a la nominal.
- La velocidad de rotación final de control será de 550, por lo tanto, se tomará el tiempo que se demore el módulo en llegar hasta ese límite.
- Los parámetros de inercia variaran en $0,05 \text{ kg} * \text{m}^2$ para cada caso propuesto, se iniciará con $0,05 \text{ kg} * \text{m}^2$ y el escenario de operación final será de $0,30 \text{ kg} * \text{m}^2$
- Para tener resultados consistente la carga utilizara para escenario de operación es de 300 ohm.

Tabla de variables de interés para cada caso

Inercia del rodete (kg/*)	Carga inicial del banco de resistencias (Ω)	Carga adicional del banco de resistencias (Ω)	Velocidad antes de aumentar carga (rpm)	RPM después de aumentar carga (rpm)	Tiempo en que demora en estabilizarse (segundos)
0.05					
0.10					
0.15					
0.20					
0.25					
0.30					

OBJETIVOS

1. Determinar la respuesta inercial del módulo dinamómetro de 4 cuadrantes en la función de turbina hidroeléctrica después de un aumento de la carga.
2. Evaluar el tiempo en que se demora estabilizar su comportamiento o si no se logra compensar el aumento de carga.
3. Graficar la respuesta inercial del módulo con respecto al tiempo con la velocidad de control asignada.

MATERIALES E INSUMOS

- Dinamómetro/Fuente de alimentación de cuatro cuadrantes - LabVolt Serie 8960-32.
- Software LVDAC-EMS función Emulador de Turbina hidroeléctrica.
- Fuente de alimentación 8525-20
- Módulo de cargas resistivas 8311-05
- Alternador sincrónico 8241
- Multímetro
- Cables tipo banana

PROCEDIMIENTO

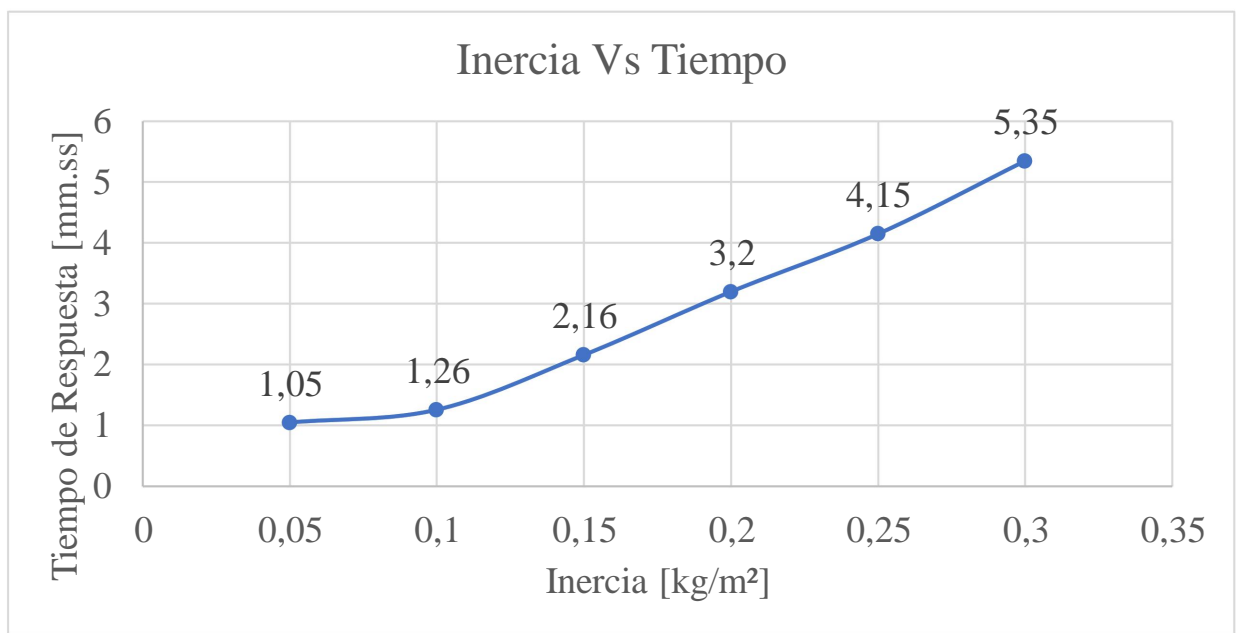
N°	ACTIVIDADES	OBSERVACIONES
1	Colocar los Módulos necesarios en el armario de LabVolt, se debe colocar de izquierda a derecha en el primer renglón de abajo, la fuente de alimentación, seguido del dinamómetro, el alternador síncrono y finalmente el banco de resistencias.	
2	Realizar la conexión en bornes en tipo estrella y alimentar en DC a la excitatriz.	

3	Conectar el multímetro para realizar la medición de tensión en bornes del alternador.	Cerciorarse de que se esté midiendo en AC.
4	Conectar un multímetro en bornes del circuito de excitación.	
5	Conectar el módulo de banco de resistencias en estrella con el alternador síncrono.	
6	Conectar el cable de adquisición de datos en la PC del laboratorio.	
7	Conectar el cable de alimentación del dinamómetro al mismo y luego a tomacorriente.	
8	Encender el dinamómetro y ejecutar el software LVSIM en el PC.	La opción a elegir en el software es de 120 V de alimentación y 60 Hz
9	Configurar al módulo en opción de dinamómetro y seleccionar el software en modo turbina hidroeléctrica Francis 300 w.	
10	Colocar los parámetros correspondientes en el apartado de la inercia del rodete de turbina hidroeléctrica.	Para el primer caso sería $0.05 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, velocidad máxima de apertura de alabes: 10 (%/s) y relación de polea 24:24.
11	Desplegar la tabla de datos en el software y registrar los parámetros de interés (velocidad, par, voltaje y apertura de álabes)	
12	Desplazar hacia arriba el deslizador hasta obtener n% de apertura de álabes para romper la inercia del rodete y disminuir el valor % para alcanzar la estabilidad del sistema.	Debe ser de forma controlada ya que, al variar la inercia, para cada caso no será el mismo porcentaje.
13	Se debe llevar el módulo a 1700 rpm, mediante el control de la apertura de válvulas.	
14	Tratar de mantener estos rpm estables antes de activar las resistencias.	

15	Activar cada uno de los selectores del módulo del banco de resistencias.	Se debe hacer de forma rápida, para evitar desbalanceo entre las fases del módulo.
16	Tomar el tiempo en el que se demora el módulo a llegar al rpm de control.	Para este caso serian 550 rpm.
17	Una vez se estabilicen las revoluciones por minuto, procederemos a tomar datos en la tabla cargada anteriormente.	Esto se tomaría en los segundos que trata en estabilizarse, en caso de que no pueda recuperar las revoluciones por minuto se debe anotar.
18	Proceder a dar parada al dinamómetro, y demás equipos en el laboratorio.	
19	Cambiar la inercia del rodete de acuerdo a la tabla de resultados planteados.	Para este caso seria $0,10 \text{ kg/m}^2$
20	Repetir los pasos realizados del 11 al 17.	Llevar el orden cronológico de los pasos para una operación eficiente.
21	Hacer el procedimiento planteado para cada una de las diferentes inercias del rodete establecidas.	La práctica finalizará cuando se hayan utilizado todas las inercias de rodete planteadas.
22	Proceder a dar parada al dinamómetro, y demás equipos en el laboratorio, además de realizar la desconexión de los equipos utilizados.	

CUADRO DE RESULTADOS

Inercia del rodete (kg/m ²)	Carga inicial del banco de resistencias (Ω)	Carga adicional del banco de resistencias (Ω)	Velocidad antes de aumentar carga (rpm)	RPM después de aumentar carga (rpm)	Tiempo en que demora en estabilizarse (segundos)
0.05	0	300	1700	550	1.05.790
0.1	0	300	1700	550	1.26.070
0.15	0	300	1700	550	2.16.780
0.2	0	300	1700	550	3.20.585
0.25	0	300	1700	550	4.15.263
0.3	0	300	1700	550	5.35.253



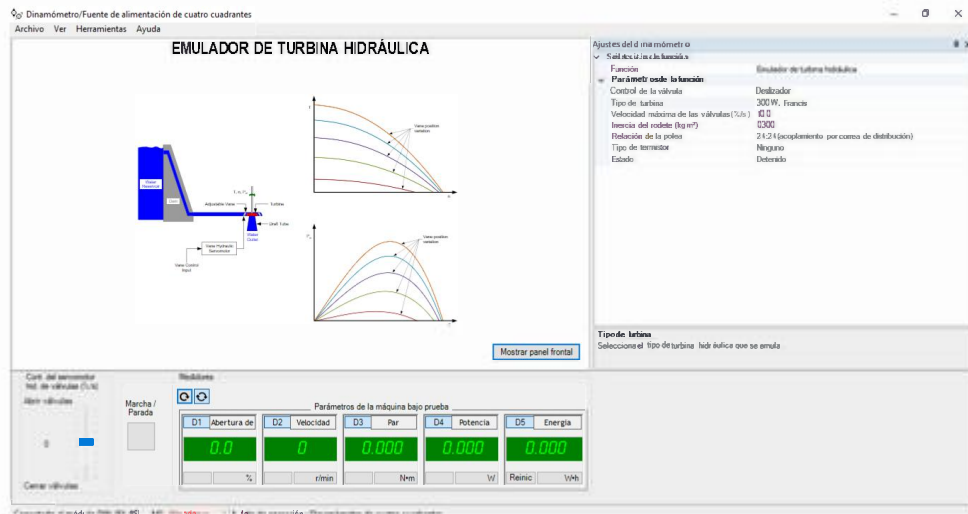
CONCLUSIONES

- Se puede concluir que, la práctica se realizó con las observaciones esperadas validando los datos observados con la bibliografía documentada, dado que, a una mayor inercia del rodete, la respuesta inercial es más estable y prolongada frente a las variaciones de la carga. Esto es debido a la energía cinética que almacena el rodete en forma de inercia lo que reduce las variaciones bruscas de rotación del Generador síncrono, por lo que, se tiene más margen de actuación para corregir la eventualidad presentada
- Así mismo, se pudo observar que, en los casos donde la inercia era menor, la respuesta se presentó de manera más inestable produciendo un decrecimiento brusco en la rotación del generador síncrono al momento en que se agregaba la carga simulando una variación repentina de la demanda en el SEP.
- Se puede observar en la operación del simulador que, cuando la inercia simulada del rotor de la turbina Francis es menor, se alcanza más rápidamente la velocidad nominal, sin embargo, el sistema es bastante inestable.

BIBLIOGRAFÍA

- Chapman, S. J., Rodríguez Pérez, C., & Santana Díaz Alfredo. (2012). *Máquinas eléctricas* (5a ed). McGraw-Hill Interamericana.
- Jiménez Muñoz, J. (2019). Integración de fuentes fotovoltaicas en una mini-red aislada con presencia de pequeñas centrales hidroeléctricas.
- Umar, B. M., Huang, X., & Wang, Z. (23 de 08 de 2024). MPID. Obtenido de Experimental Flow Performance Investigation of Francis Turbines from Model to Prototype: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/17/7461>
- Wang, Ly., Zhang, Jj. & Fan, Hg. Optimization of closing law of turbine guide vanes based on improved artificial ecosystem algorithm. *J Hydrodyn* 35, 582–593 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42241-023-0034-y>

ANEXOS



Fecha de Elaboración: 19/10/2024

Elaborado por: Bailón Cañarte Jesús Roberto

Flores Castro Guido Fernando

REVISADO POR:

Dr. Vladimir Jaramillo García

FECHA: 19/10/2024