



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

Título:

“Análisis paramétrico para la evaluación de operación de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Electricidad
mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Autores:

León Reinoso Edwin Nicolás

Mena Abril Pedro Santiago

Tutor:

Ing. Víctor Hugo Hidalgo, DSc.

LATACUNGA – ECUADOR

2021

AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “Análisis paramétrico para la evaluación de operación de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2” presentado por **LEÓN REINOSO EDWIN NICOLÁS** y **MENA ABRIL PEDRO SANTIAGO**, para optar por el título de Magister en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes, considerando que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores, con la finalidad de que se designe fecha de exposición y defensa pública.

Latacunga, junio 03 de 2021



.....
Ing. Víctor Hugo Hidalgo, DSc.
CL. 1715476758

AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: "Análisis paramétrico para la evaluación de operación de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2", ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que los estudiantes puedan presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, julio 27 de 2021

.....
MSc. Guamán Cuenca Willian Patricio
Cl. 060357895-6
Presidente del Tribunal

.....
MSc. Pesantez Palacios Gabriel Napoleón
Cl. 030189388-9
Lector 2

.....
MSc. Castillo Fiallos Jessica Nataly
Cl. 060459021-6
Lector 3

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación, producto de mi esfuerzo y sacrificio en tiempos complejos de pandemia fue un gran reto; el mismo ofrezco con mucho amor a Dios, a mis padres y abuelitos que desde el cielo me iluminaron con sabiduría e inteligencia; a mi hermana, a mis tías y especialmente a mi tía Marcia que es mi segunda madre, por su apoyo incondicional, inquebrantable y perenne, inculcándome valores éticos y morales que me han ayudado a caminar seguro por el sendero del triunfo, el éxito y la toma de decisiones acertadas; por fortalecerme en los momentos de dificultad para no decaer y seguir luchando en mi formación profesional para ser útil al servicio de la sociedad Ecuatoriana.

Nicolás

A mis hijos: Santiaguito, Sophie y a mi esposa Doris que fueron la inspiración durante esta etapa de estudios, a ellos que fueron parte del esfuerzo y sacrificio para cumplir este sueño, pese a las condiciones de pandemia llegamos a la meta significando para mí un gran reto culminado con mucho mérito.

Santiago

AGRADECIMIENTO

Agradecemos ostensiblemente:

A la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A. por la apertura para el desarrollo de esta investigación, de manera especial al Ing. José Semanate Noroña y a la Dirección de Generación por el apoyo y las facilidades brindadas, las mismas que nos permitieron terminar con éxito este sueño universitario.

Al PhD. Víctor Hugo Hidalgo, por su apoyo incondicional y ayuda desprendida en la ejecución de esta investigación, compartiendo conocimientos, experiencias, consejos y por su predisposición en todos los temas desarrollados en este proyecto.

Nicolás y Santiago

A nuestros distinguidos amigos de aula, en especial a los Ingenieros Santiago y Carlos por su generosa amistad, por esos momentos de paciencia, sabiduría y comprensión en situaciones laborales y estudiantiles.

Nicolás

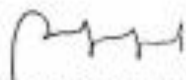
Expreso mi gratitud a Dios por cuidarnos y llenar de bendiciones a mi familia; a mis padres Inés y Leónidas y mis hermanos por brindarme sus consejos y ánimos en esta etapa; a mis hijos y esposa por permitirme desprotegerlos mientras estudiaba. Finalmente, gracias a mis amigos Nicolás, Carlos y Pauly que formaron parte de este momento universitario.

Santiago

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quienes suscriben, declaran que asumen la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, julio 27 de 2021



Edwin Nicolás León Reinoso

CI. 050332009-5



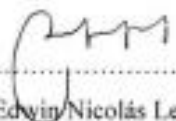
Pedro Santiago Mena Abril

CI. 050296171-7

RENUNCIA DE DERECHOS

Quienes suscriben, ceden los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, julio 27 de 2021



Edwin Nicolás León Reinoso
CL 050332009-5



Pedro Santiago Mena Abril
CL 050296171-7

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: **"Análisis paramétrico para la evaluación de operación de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2"**, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, julio 27 de 2021



.....
MSc. Guaman Cuenca Willian Patricio
CI. 060357895-6

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

Título: “ANÁLISIS PARAMÉTRICO PARA LA EVALUACIÓN DE OPERACIÓN DE LAS UNIDADES DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ILLUCHI N° 2”.

Autores: León Reinoso Edwin Nicolás y Mena Abril Pedro Santiago

Tutor: Ing. Víctor Hugo Hidalgo, DSc.

RESUMEN

El proyecto de investigación busca obtener la máxima eficiencia de la central hidroeléctrica Illuchi N° 2 de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A., mediante el análisis paramétrico de las variables operativas y que se ha validado a través de mediciones de campo con el método experimental, una vez caracterizado el proceso se determinó las mejores condiciones operativas enfocadas a la reducción de pérdidas eléctricas y mecánicas, durante el análisis se identificó las variables de mayor impacto que reflejan deficiencias en el proceso. Para que el proceso de solución matemática sea más exacto y confiable se utilizó el solucionador de ecuaciones de ingeniería Engineering Equation Solver (EES) aprovechando principalmente el módulo de funciones matemáticas, de fluidos y termo físicas para resolver de manera eficiente cientos de ecuaciones, por lo que, se desarrolló un código modelo para realizar la identificación, evaluación y caracterización. El modelo paramétrico consideró ejecutar una familia de probabilidades con un número finito de parámetros buscando la mejor opción o condición operativa para la maximización de producción de energía eléctrica, con la aplicación de éstas se llegó a evitar pérdidas en un 4.4% debido estrictamente al control de los factores analizados, lo cual equivale a 1145.65 MW/h y a USD. 43.533,03 al año, buscando como resultado la aplicación de una propuesta y recomendaciones en base a los análisis con disposiciones y consignas operativas únicamente sin invertir dinero ya que el objeto de estudio buscaba evitar controlar pérdidas en la operación de la central para mejorar la disponibilidad, eficiencia, rendimiento y con ello la rentabilidad de la central.

PALABRAS CLAVES: Generadores, análisis paramétrico, eficiencia hidráulica, pérdidas eléctricas y mecánicas; y, variables operacionales.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

Title: "PARAMETRIC ANALYSIS FOR OPERATION ASSESSMENT OF THE GENERATION UNITS OF THE ILLUCHI N° 2 HYDROELECTRIC POWER PLANT".

Authors: León Reinoso Edwin Nicolás y Mena Abril Pedro Santiago

Tutor: Ing. Victor Hugo Hidalgo, DSc.

ABSTRACT

The research project seeks to obtain the maximum efficiency of the Illuchi N° 2 hydroelectric power plant of ELEPCO S.A. company; through the parametric analysis of the operating variables and validated through field measurements with the experimental method, once the process was characterized, the best operating conditions focused on the reduction of electrical and mechanical losses were determined, during the analysis the variables with the greatest impact that reflect deficiencies in the process that cause losses were identified. So, to make the process more accurate and reliable, the Engineering Equation Solver (EES) was used, taking advantage of the mathematical, fluid and thermo-physical functions module to efficiently solve hundreds of equations, and a model code was developed to perform the identification, evaluation and characterization. Then, the parametric model considered running a family of probabilities with a finite number of parameters looking for the best option or operating condition for maximizing electricity production, with the application of these, we were able to avoid losses of 4.4% due strictly to the control of the factors analyzed, this is equivalent to 1145.65 MW/h and \$ 43533.03 USD per year, seeking as a result the application of a proposal and recommendations based on the analysis with provisions and operational instructions only without investing money, since the object of the study was to avoid controlling losses in the operation of the plant to improve the availability, efficiency, performance and thus the profitability of the plant.

KEY WORDS: Generators, parametric analysis, hydraulic efficiency, electrical and mechanical losses, operational variables.

Nelly Patricia Mena Vargas con cédula de identidad número: 050157429-7 Licenciada en Ciencias de la Educación, profesora de enseñanza media especialización de idiomas: Inglés y Francés con número de registro de la SENESCYT: 1005-05-576906, **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: "ANÁLISIS PARAMÉTRICO PARA LA EVALUACIÓN DE OPERACIÓN DE LAS UNIDADES DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ILLUCHI N° 2" realizado por: León Reinoso Edwin Nicolás y Mena Abril Pedro Santiago, aspirantes a magister en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.



Lic. Nelly Patricia Mena Vargas
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS UTC
CI. 050157429-7

Latacunga, junio 07 de 2021



ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
AVAL DEL TUTOR.....	¡Error! Marcador no definido.
AVAL DEL TRIBUNAL.....	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA	¡Error! Marcador no definido.
RENUNCIA DE DERECHOS.....	¡Error! Marcador no definido.
AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL.....	¡Error! Marcador no definido.
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	¡Error! Marcador no definido.
ÍNDICE DE CONTENIDOS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
INTRODUCCIÓN	18
Planteamiento del problema:	18
Formulación del problema:	19
Objetivo general:	19
Objetivos específicos:.....	19
Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos:	20
Justificación.....	21
CAPÍTULO I.....	23
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA – METODOLÓGICA	23
1.1. Antecedentes de la investigación	23
• Centrales de generación con fuentes de energía renovable en el Ecuador ...	24

• Modelado y simulación de centrales hidráulicas	24
• Monitoreo de variables eléctricas relacionadas al generador trifásico	25
• Análisis energético de una central termoeléctrica	26
• Análisis paramétrico mediante CFD del comportamiento hidrodinámico de un álabe de turbina para condiciones de baja velocidad.....	26
• Desarrollo de un método de diseño y análisis por simulación numérica de las turbinas de acción de flujo cruzado para micro centrales hidroeléctricas	27
• Diseño paramétrico de álabes para turbinas Francis.....	27
• Identificación paramétrica de un generador síncrono a partir de la prueba de escalón de voltaje.....	28
• Modelación y estimación paramétrica en línea de la máquina sincrónica de reluctancia.....	29
• Comportamiento aerodinámico del rotor de un generador eólico de eje horizontal – estudio paramétrico	29
1.2. Fundamentación teórica	30
• La generación de energía eléctrica.....	30
• El aprovechamiento del agua	31
• La eficiencia en la generación hidroeléctrica.....	32
• Las pequeñas centrales de generación hidroeléctrica	33
• Central hidroeléctrica.....	34
• Componentes de una central hidroeléctrica	35
• Escala de utilidad de los generadores de energía.....	38
1.3. Fundamentación metodológica	41
• Tipo de investigación.....	41

• Métodos de investigación	43
• Técnicas e instrumentos	43
1.4. Conclusiones:	45
CAPÍTULO II	46
2.1. Título del proyecto:	46
2.2. Objetivo del proyecto:	46
2.3. Justificación.....	46
2.4. Descripción de la propuesta:	47
2.5. Pérdidas mecánicas y eléctricas	49
2.5.1. Pérdidas mecánicas	49
2.5.2. Pérdidas en el núcleo.....	53
2.5.3. Pérdidas eléctricas o pérdidas en el cobre.....	54
2.5.4. Pérdidas dispersas o adicionales	55
2.6. Diagrama de flujo de potencia	55
2.7. Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados.	56
2.7.1. Modelo paramétrico	56
2.8. Conclusiones Capítulo II.....	61
CAPÍTULO III	63
3.1. Análisis de los resultados	63
3.2. Estructura del Código de Programación.....	63
3.2.1. Parámetros conocidos:	64
3.2.2. Cálculos preliminares.....	65
3.2.3. Cálculo de la velocidad del jet	66

3.2.4. Cálculo de la potencia hidráulica	68
3.2.5. Pérdidas eléctricas:.....	69
3.2.6. Cálculo de la potencia total y la eficiencia de la planta	74
3.3. Funcionamiento del código de programación.....	75
3.4. Resultados.....	76
• Variación de la altura neta en relación a las pérdidas en bruto.....	76
• Variación de la potencia de los generadores en relación a la apertura del inyector relacionado al caudal	78
• Diferencia de potencia por altura en referencia al diseño de las turbinas.....	80
• Variación de la apertura del inyector relacionada la diferencia de potencia de las unidades y su velocidad.....	81
• Variación del ángulo de inyección de agua relacionado a la potencia eléctrica.....	83
• Variación del rendimiento en la secuencia de ingreso u operación de arranque de las unidades	84
3.5. Validación	85
3.6. Análisis Técnico-Económico	87
CONCLUSIONES	89
RECOMENDACIONES	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXOS	94

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1. Armadura giratoria con devanado de campo estacionario.....	37
Fig. 2. Rotación de armadura y producción de voltaje.	38
Fig. 3. Generador de corriente alterna monofásico.	39
Fig. 4. Generador de corriente alterna trifásico.....	40
Fig. 5. Diagrama de flujo del proceso.	45
Fig. 6. Diagrama de flujo de potencia de un generador de C.A. trifásico.	55
Fig. 7. Representación esquemática de tuberías y turbinas de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.	57
Fig. 8. Estructura de cálculo de parámetros agrupados e individuales.	59
Fig. 9. Variación de la altura neta en relación a las pérdidas.....	77
Fig. 10. Variación de la apertura del inyector en relación a la potencia eléctrica.	79
Fig. 11. Variación de la apertura del inyector en relación a la potencia eléctrica con vínculo al caudal.	79
Fig. 12. Relación de la potencia entre unidades.....	80
Fig. 13. Diferencia de potencia de las unidades y su velocidad.....	82
Fig. 14. Variación ángulo de inyección de agua relacionado a la potencia eléctrica..	84
Fig. 15. Pérdida de potencia en el arranque.	85

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos.....	20
TABLA 2. Costos de producción de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2	33
TABLA 3. Datos generales de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.....	48
TABLA 4. Fórmulas para el cálculo de los parámetros dentro de la metodología del análisis paramétrico para la evaluación de operación de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2	59
TABLA 5. Parámetros ambientales	64
TABLA 6. Parámetros geométricos y de funcionamiento de la tubería	64
TABLA 7. Parámetros geométricos y de funcionamiento de la turbina	65
TABLA 8. Parámetros eléctricos	65
TABLA 9. Cálculos preliminares	66
TABLA 10. Cálculo de la velocidad jet.....	67
TABLA 11. Cálculo de la potencia hidráulica.....	68
TABLA 12. Parámetros de equipos eléctricos Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2. ..	70
TABLA 13. Cálculo de las pérdidas totales de los generadores, Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.....	71
TABLA 14. Cálculo de las pérdidas totales de la excitatriz, Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.....	72
TABLA 15. Cálculo de las pérdidas totales en el transformador de potencia, Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.....	72
TABLA 16. Las aislaciones se clasifican según su grado de resistencia térmica.....	73
TABLA 17. Cálculo de la potencia total y la eficiencia de la planta Illuchi N° 2.	74
TABLA 18. Altura neta en relación a potencia.....	77
TABLA 19. Potencia de los generadores en relación a la apertura del inyector relacionado al caudal.....	78
TABLA 20. Diferencia de potencia por altura en referencia al diseño de las turbinas.....	80
TABLA 21. Turbinas Pelton Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.	81

TABLA 22. Apertura del inyector relacionada la diferencia de potencia de las unidades y su velocidad.	81
TABLA 23. Ángulo de inyección de agua relacionado a la potencia eléctrica	83
TABLA 24. Rendimiento en la secuencia de ingreso u operación de arranque de las unidades.....	84
TABLA 25. Rendimiento de la Unidad N° 1.	86
TABLA 26. Rendimiento de la Unidad N° 2.	86
TABLA 27. Parámetros de Evaluación.....	87

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del problema:

La eficiencia de las unidades de generación se ve afectada por los parámetros de operación visto desde la rentabilidad, estos disminuyen la capacidad, disponibilidad e incluso el rendimiento de las unidades de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2. Al realizar la operación y control de las máquinas con un sistema semi manual con equipamiento antiguo su producción no es óptima, se debe medir las variables eléctricas de rendimiento y establecer un análisis paramétrico con el fin de evaluar la eficiencia. El principal problema radica en el decremento de la disponibilidad operativa de las unidades, del histórico de fallas se sabe que la disponibilidad decrece en al menos 0.74% anual promedio y esta tendencia ha sido marcada desde el año 2015, en el año 2019 se llegó a tener una disponibilidad del 96,09%, mientras que en el año 2020 se actuó con varias actividades de mejoramiento al rendimiento pero se logró recuperar la disponibilidad a 96.64%, debido a la condición operativa y de las unidades se requiere actuar en varios puntos atacando algunas variables para recomendar las acciones y mejorar la disponibilidad de la central, es urgente romper la tendencia a la baja debido a las penalizaciones a la empresa por no cumplir con estándares de rendimiento en la central, la diferencia de disponibilidad actual representa una pérdida de 269420 kWh anuales.

Con referencia a la rentabilidad la disponibilidad no solamente se ve afectada por la pérdida de generación, sino que también el incremento de actividades de mantenimiento por ende costos de mantenimiento en aumento, por ejemplo, en el año 2018 se incrementó los costos en un 12.8%, mientras que en el año 2020 aumentó en un 14.6%. Al evaluar técnicamente el estado de los componentes de las máquinas se sabe que los elementos principales (Generador – turbina) tienen buenas condiciones, mientras que los periféricos de control representan la mayor incidencia de fallas.

Al realizar la observación de condiciones actuales es necesario plantear un análisis paramétrico de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2

para la verificación de los datos eléctricos y operativos de mayor incidencia, de modo que se pueda plantear una estrategia acertada que ayude a solucionar los problemas actuales.

Según la Dirección de Generación de ELEPCO S.A., en generación hidroeléctrica, se dedica en promedio de tiempo de 16 horas de mantenimiento preventivo (con parada de máquina) y al menos 120 horas de actividades preventivas en el conjunto máquina turbina-generador y sistemas auxiliares anualmente, pero nunca se invierte tiempo para revisar el rendimiento, no se mide la eficiencia, lo que indica que es necesario hacer un análisis específico; por esta falencia, se plantea desarrollar un modelo paramétrico para la evaluación de la operación de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.

Formulación del problema:

¿Cómo afecta en la operación los parámetros, mecánicos y eléctricos en la eficiencia de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2?

Objetivo general:

Desarrollar un modelo paramétrico para la evaluación de la operación de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2, para mejorar la disponibilidad, eficiencia, rendimiento y con ello la rentabilidad de la central.

Objetivos específicos:

- Revisar las fuentes bibliográficas para buscar los parámetros del proceso de operación de las unidades de generación para recolectar datos, analizar la caracterización y variables eléctricas de la central.
- Determinar los parámetros de operación que tienen mayor impacto en la caída de rendimiento en la condición actual de la central.
- Elaborar el modelo paramétrico de operación de las unidades comparando datos históricos disponibles en la Central para analizar con los datos obtenidos en el cálculo, determinar el rendimiento y plantear mejoras al proceso.
- Revisar resultados y plantear soluciones a corto y largo plazo que permitan

optimizar la operación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2 en base a los resultados obtenidos a través del modelo paramétrico.

Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos:

TABLA 1
SISTEMAS DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Revisar las fuentes bibliográficas para buscar los parámetros del proceso de operación de las unidades de generación para recolectar datos, analizar la caracterización y variables eléctricas de la central.	Revisión bibliográfica. Determinación de los parámetros en las unidades. Análisis de las variables Análisis y recolección de datos.	- Definir base de datos. -Caracterización de la información.	- Observación sistemática. - Análisis de contenido.
Determinar los parámetros de operación que tienen mayor impacto en la caída de rendimiento en la condición actual de la central.	Determinación de los parámetros de operación de las máquinas.	- Detectar variables de mayor incidencia. -Análisis de parámetros.	- Procesar la información. (Pareto.)
Elaborar el modelo paramétrico de operación de las unidades comparando datos históricos disponibles en la Central para analizar con los datos obtenidos en el cálculo, determinar el rendimiento y plantear mejoras al proceso.	Elaboración del modelo con referencia a datos históricos.	-Caracterización del modelo. -Elaboración, ajuste y aplicación del código -Base de datos. -Memoria de Cálculo.	- Procesar la información. (diagrama causa efecto.)
Revisar resultados y plantear soluciones a corto y largo plazo que permitan optimizar la operación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2 en base a los resultados obtenidos a través del modelo paramétrico.	Desarrollo del plan de mejora para repotenciar la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2	- Tablas de datos óptimos de operación. -Recomendaciones operativas y levantamiento del Plan de consignas operativas, ajustes al plan de mantenimiento	Análisis de resultados con criterio de expertos para validar la propuesta.

Elaborado por: Autores.

Justificación

La siguiente investigación tiene como propósito mejorar la disponibilidad, eficiencia y rendimiento de la central, mediante el desarrollo de un modelo paramétrico para el análisis de operación de las unidades de generación, lo cual beneficiará en forma directa a los recursos económicos, sociales, etc. de ELEPCO S.A. y a la población para el desarrollo del buen vivir.

En la actualidad los procesos de operación no se vienen desarrollando de una manera eficaz y eficiente, en vista de que la operación actual de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2 es netamente manual, lo cual se propone mejorar el grado de producción, mediante el planteamiento de condiciones para optimizar la generación de la mencionada central e incrementar el factor de rendimiento a partir de la condición inicial de los grupos generadores.

Al realizar un modelo paramétrico, se obtiene la información de datos con instrumentos de medición, parámetros de temperatura, presión, velocidades lineales y angulares y parámetros eléctricos, que permitirá realizar diferentes tipos de análisis como por ejemplo planificación y mejoramiento de la operación de los generadores y otras asociadas al desempeño económico de la central.

Al disponer de un modelo paramétrico para la evaluación de las variables de operación de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2, permitirá aprovechar la producción a mejor nivel de los generadores en las labores de operación. La relevancia del proyecto investigativo pretende mejorar la calidad de servicio eléctrico en la generación, aprovechar los recursos de la empresa y plantear las recomendaciones para mejorar o repotenciación de las unidades.

El modelo se plantea validar con las pruebas de campo a realizar en las centrales de generación, con la que se demostrará la aplicabilidad del presente estudio paramétrico planteado.

El impacto del desarrollo del presente trabajo contribuye a alcanzar el OBJETIVO DE DESARROLLO SUSTENTABLE N° 7 referente a energía asequible y no

contaminante, la energía es fundamental para casi todos los grandes desafíos y oportunidades a los que hace frente el mundo actualmente, ya sea para el empleo, la seguridad, el cambio climático, la producción de alimentos o para aumentar los ingresos, el acceso universal a la energía es esencial.

La generación hidroeléctrica tiene la ventaja de ser amigable con el medio ambiente que no produce deterioro en la atmósfera ni en el agua y no daña la flora ni la fauna, un ejemplo de este análisis es el uso del agua turbinada de la Central Hidroeléctrica Illuchi N°2, para consumo humano de la población como agua potable después de su proceso de potabilización.

Al realizar este modelo paramétrico prácticamente ayudará a la reducción de costos de mantenimiento, paros en la generación de energía eléctrica e incremento de la eficiencia de la central.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA – METODOLÓGICA

En base a los datos que se indican en las secciones anteriores se ha visto la necesidad de proponer un proyecto en el que se utilice un modelo paramétrico que permita la evaluación de la producción de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2, que abarque los diferentes conocimientos, softwares, teorías, conceptos, adquiridos y recopilados en la investigación que se propone realizar.

1.1. Antecedentes de la investigación

El Ecuador se caracteriza por ser un país que posee una red hidrográfica, a excepción de las zonas occidental y meridional catalogadas como áridas y que se encuentran cercanas a la región Costa. En el territorio nacional existen aproximadamente poco más de 2000 ríos y arroyos que nacen en la Cordillera de los Andes y llegan hasta la zona oeste, específicamente al Océano Pacífico y en la parte este hacia el río Amazonas[1].

Nuestro país cuenta con 29 sistemas hídricos compuestos por 79 cuencas, la vertiente del pacífico está conformada por 22 sistemas hídricos que cubren el 48,07%, equivalente a 123.243 km² de superficie. La vertiente del río Amazonas está conformada por 7 sistemas que cubren el 51,41%, equivalente a 131.802 km² de superficie nacional. El restante 0,52% de territorio corresponde a la región insular de Galápagos con 1.325 km². Las pequeñas centrales presentan grandes ventajas sobre las medianas y grandes centrales como por ejemplo el impacto ambiental es prácticamente nulo, el costo más bajo, los sitios para el desarrollo de las mismas son abundantes. Con el inmenso recurso hídrico que cuenta el Ecuador las pequeñas

centrales constituye una alternativa válida con gran proyección para su desarrollo a lo largo de todo el territorio nacional [2].

Cabe señalar que los siguientes artículos citados exponen su efecto, impacto y resultados alcanzados, los mismos que tienen relación con el problema planteado, lo cual permite ver la factibilidad del análisis propuesto.

- **Centrales de generación con fuentes de energía renovable en el Ecuador**

En el año 2018, la potencia nominal a nivel nacional fue 8.676,89 MW; de los cuales, 5.271,74 MW (60,75 %) corresponden a centrales con fuentes de energía renovable y 3.405,14 MW (39,25 %) a centrales con fuentes de energía no renovable. La capacidad instalada de las centrales hidroeléctricas destaca mayoritariamente (96,2 %) entre las de tipo renovable. Estas centrales se encuentran instaladas en tres regiones del Ecuador: Costa (2 provincias), Sierra (9 provincias) y Amazonía (4 provincias).

Azuay presenta la mayor concentración de potencia nominal, conformada principalmente por los 1.075 MW de la Central Hidroeléctrica Paute de CELEC EP Unidad de Negocio Hidropaute, en segundo lugar, se encuentra Napo, con el aporte de 1.500 MW de la central Coca Codo Sinclair de CELEC EP Unidad de Negocio Coca Codo Sinclair.

La Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2 contribuye al Sistema Nacional de Electrificación con 5.20 MW de potencia nominal [3].

- **Modelado y simulación de centrales hidráulicas**

En este trabajo han diseñado en EcosimPro una librería con los componentes necesarios para modelar una central hidráulica, han creado un tipo de central de paso o fluyente con carácter general, que pueda usarse para varias centrales simplemente modificando sus parámetros; para facilitar el uso de dicho modelo, han desarrollado una aplicación en Visual Basic desde la que se realizan las simulaciones; además, han diseñado con un aspecto similar a los programas de control usados en los sistemas de

supervisión de las centrales de la empresa Endesa, de manera que sirva como entrenador al operario.

La central de Villafranca en Córdoba se ha usado como ejemplo de aplicación del simulador, obteniendo unos resultados satisfactorios, su respuesta permite facilitar soluciones de manera rápida y sin costo con el análisis de situaciones dispares que ayudan a mejorar determinados aspectos de la central como:

- Estabilidad de sistema.
- Rendimiento de la instalación.
- Disminución del número de arranques.

Por otro lado, el simulador puede ser de gran utilidad para analizar cómo se comporta el sistema, al menos de una forma aproximada, en situaciones extremas que se presentan de forma inesperada en los ríos y son difíciles de controlar, como las avenidas[4].

- **Monitoreo de variables eléctricas relacionadas al generador trifásico**

Los generadores trifásicos son máquinas ampliamente utilizadas como fuentes de energía eléctrica. Es común encontrarlos asociados a sistemas de alimentación alternativos como grupos electrógenos, micro centrales hidráulicas y generadores eólicos. Usualmente estos generadores, de baja y media potencia, no cuentan con la instrumentación adecuada para que el usuario pueda establecer su óptimo funcionamiento, en este trabajo se describe el diseño y puesta a punto de un sistema para la medición de las variables asociadas a un generador trifásico. Se desarrollaron dos módulos: uno de tensión, que adicionalmente se encarga de medir la frecuencia y verificar la secuencia de fase; mientras que el otro módulo mide la corriente eléctrica.

El procesamiento de la información se realiza con microcontroladores PIC 16F873, a los cuales se adaptaron los transformadores de medida y demás dispositivos para el acondicionamiento de las señales. Cada módulo permite la visualización de las variables a través de una pantalla de cristal líquido. El rango de operación del sistema es de 22 a 150 VAC, con un error relativo máximo de 7.6%; mientras que la corriente puede variar 100 A, con un error relativo máximo de 6.3% [5].

- **Análisis energético de una central termoeléctrica**

La eficiencia energética de esta central termoeléctrica es del 36.76% con respecto al poder calorífico inferior del combustible. El proceso en donde se pierde más energía es en el enfriamiento de los gases de combustión, es decir, al suministrar el exceso de aire necesario para disminuir la temperatura de los gases con el 23.64% de las pérdidas.

Se identifica que en el generador de vapor se tienen las mayores y mínimas irreversibilidades en las bombas.

En la turbina, las mayores irreversibilidades se tienen en la expansión del vapor, por consiguiente, una mala operación implicaría la disminución de la η_{SIT} ; una disminución del 1% en la eficiencia isoentrópica provoca un decremento en la eficiencia energética del 0.65%. Así mismo, se identifica que la etapa de presión intermedia es donde se tiene la menor generación de irreversibilidades, debido a que en ésta se genera menos potencia, la relación de presiones es de 3.64 mientras que en la etapa de baja presión es de 78 y es donde se tienen la mayor generación de potencia y de irreversibilidades [6].

- **Análisis paramétrico mediante CFD del comportamiento hidrodinámico de un álabe de turbina para condiciones de baja velocidad**

En el presente artículo se muestran los resultados obtenidos en la simulación numérica de un perfil elíptico de turbina para una velocidad de corriente de agua y ante distintos ángulos de ataque al mismo. La simulación se realiza con un software CFD cubriendo una gama de ángulos de ataque del flujo y dos espesores de álabe del 9% y el 18% de la cuerda. El modelo de turbulencia utilizado ha sido el Spalart-

Allmaras. Se realiza un estudio del comportamiento del flujo alrededor del álabe y de los coeficientes de sustentación y arrastre para ambos espesores.

La formación de la burbuja de desprendimiento difiere en el ángulo de ataque del flujo para cada espesor. Los máximos valores de sustentación alcanzados son distintos, siendo mayor para el que presenta mayor espesor, así como igualmente, experimenta mayores valores de arrastre. Los ángulos críticos para cada espesor son distintos, siendo de 11 grados para el de menor espesor y de 13 grados para el de mayor espesor [7].

- **Desarrollo de un método de diseño y análisis por simulación numérica de las turbinas de acción de flujo cruzado para micro centrales hidroeléctricas**

En este trabajo se presenta una revisión y análisis del estado del arte sobre el desarrollo y evolución histórica de la turbina de flujo cruzado (TFC), los estudios que se han realizado en Colombia, descripción física, funcionamiento, las ventajas con relación a las otras turbinas de acción, las facilidades constructivas y su potencial aplicación para la generación de energía eléctrica a pequeña escala, en proyectos que no superen una potencia de 10 kW, que a pesar de parecer muy pequeños, pueden solucionar en gran parte las necesidades de energía eléctrica en zonas no interconectadas que carecen de este recurso pero disponen de una fuente hídrica que se puede aprovechar con este tipo de turbina.

Se desarrolló un método de diseño, con el cual partiendo de las condiciones del recurso: caudal y altura neta, hace posible el cálculo y dimensionado de todas sus partes y se muestra la utilidad de un software de simulación para predecir el comportamiento de las principales variables, logrando determinar los rangos de utilización y las condiciones de máxima eficiencia [8].

- **Diseño paramétrico de álabes para turbinas Francis**

El diseño paramétrico del álabe para una turbina Francis entregó resultados satisfactorios, lo que permitió tener una visión más amplia del comportamiento de

esta turbina, así como de las variables que influyen, siendo útil como una primera aproximación en orden el tener un diseño más preciso.

Los modelos de erosión que se encuentran en softwares comerciales están limitados a rangos y aplicaciones específicas, debido a que estos usan modelos empíricos; en consecuencia, estos no siempre tienen una precisión numérica, lo que ocasiona que en su mayoría puedan ser interpretados como un indicador cualitativo de la erosión[9].

- **Identificación paramétrica de un generador síncrono a partir de la prueba de escalón de voltaje**

En este trabajo se identifica paramétricamente el modelo de un generador síncrono de 7 kVA, 220 V, 60 Hz de polos salientes. El modelo de identificación empleado fue el autorregresivo con entrada exógena (ARX) clasificado dentro de los modelos de caja negra. Los datos experimentales, procesados por el toolbox de identificación de Matlab®, fueron tomados de la prueba de escalón de voltaje aplicado en los ejes dQ del generador, mediante tareas adquisitoras de datos programadas en LabView®. Los resultados mostraron un ajuste aceptable entre el modelo polinomial ARX obtenido y las mediciones de corriente tomadas del generador bajo estudio.

El comportamiento en una máquina síncrona está compuesto por la interacción de fenómenos, eléctricos, magnéticos, térmicos y mecánicos; esto ocasiona que los fenómenos resultantes sean numerosos y complejos. Emplear un modelo para representar tal cantidad de fenómenos requeriría de un considerable esfuerzo de cálculo y análisis. Una práctica común que minimiza este esfuerzo, sin sacrificar precisión, es modelarlo de forma sencilla considerando los fenómenos más relevantes, lo cual brinda buenos resultados a un esfuerzo de análisis menor. Se empleó un relevador de mercurio, el cual tiene la característica de evitar rebotes en su activación y consecuentemente evita el ruido indeseable en las señales transitorias de voltaje y de corriente del generador.

Por otra parte, en este trabajo no se estimaron los parámetros fundamentales del generador, sin embargo, los datos obtenidos de pruebas pueden ser empleados con

este fin, empleando algún método de optimización, ya sea determinístico o estocástico para obtener los parámetros de la máquina síncrona [10].

- **Modelación y estimación paramétrica en línea de la máquina síncrona de reluctancia**

En este trabajo se analizan en detalle los modelos de la máquina síncrona de reluctancia (SynRel) en coordenadas naturales, vectores espaciales y $dQ0$. Se desarrolla un modelo dinámico para la SynRel de arranque directo en coordenadas naturales, que considera las pérdidas en el núcleo ferromagnético y se propone un sistema por unidad dirigido a los modelos de la SynRel en coordenadas naturales y de régimen dinámico. Se desarrolla un modelo en elementos finitos de la SynRel con rotor de laminado transversal, de dos pares de polos, y con una capacidad nominal de 40 kW, el cual se utiliza para estudiar el efecto de la saturación en el funcionamiento de la máquina. Se propone una metodología centrada en el uso de tablas de datos para estimar los parámetros de la máquina en cada instante de control y se prueba a nivel de simulación mediante un control predictivo que utiliza los principios del control directo de par (DTC) para accionar al convertidor. Los aportes principales de este trabajo de investigación son: el método de estimación de parámetros en línea y el modelo de la SynRel que considera la saturación y la variación de las inductancias de dispersión con la posición de la pieza polar. El conjunto se implementa a nivel de simulación, donde los resultados exhiben su potencial para estudios dinámicos [11].

- **Comportamiento aerodinámico del rotor de un generador eólico de eje horizontal – estudio paramétrico**

En este trabajo se presenta una herramienta computacional que está siendo actualmente desarrollada para simular numéricamente el comportamiento aerodinámico de rotores de generadores eólicos de eje horizontal y gran potencia (mayor a 1MW) cuando se varían algunos de los parámetros que definen la geometría de los mismos o la dirección del viento incidente, como ejemplo de aplicación, se estudia como varía la potencia producida en función de la dirección relativa del viento respecto al eje del rotor o de la conicidad de las palas.

El rango de velocidades de operación del rotor (subsónico bajo) se conjuga con las grandes dimensiones de su geometría dando lugar a flujos incompresibles con elevados números de Reynolds, este hecho avala la hipótesis de que los efectos viscosos son confinados únicamente a las capas límite y las estelas vorticosas, y permite estimar las cargas aerodinámicas implementando el método de red de vórtices no-lineal e inestacionario. Los datos necesarios para llevar a cabo estas simulaciones numéricas son: i) la geometría del rotor; ii) la cinemática del rotor (modelado como una colección de cuerpos rígidos); y iii) la corriente de aire que puede variar en el tiempo, tanto en magnitud como en dirección. Los datos que caracterizan el flujo incidente pueden ser de origen sintético, o bien, pueden ser obtenidos experimentalmente a partir de mediciones de campo [12].

1.2. Fundamentación teórica

A la fecha de realización de esta investigación se encontró cuantiosa información acerca de este tema, En este capítulo se dará a conocer la información teórica necesaria para poder realizar el análisis paramétrico, lo cual se resume a continuación:

- *La generación de energía eléctrica*

La energía eléctrica a partir de su aplicación residencial, comercial e industrial ha sido un factor determinante para la economía y el desarrollo social en todos los aspectos del mundo, que si bien al inicio fue utilizada para los sistemas de alumbrado público posteriormente se convirtió en la fuerza motriz que necesitaba la industria para su desarrollo, también se constituyó una herramienta necesaria para el confort de los hogares. La electricidad es probablemente la energía más utilizada, es la energía más conocida, es la energía más fácil de generar, su producción está vinculada a la transformación de energías, la energía eléctrica es la energía más sencilla de transportar en grandes bloques de potencia a largas distancias y también es fácil de

transformar para aprovechar en otros tipos de energía. En la industria la energía eléctrica es el motor de la producción.

Esta pequeña introducción nos hace ver que la electricidad desde que se descubrió el fenómeno eléctrico hasta nuestros días, no ha hecho más que evolucionar la industria y la tecnología hasta ser parte trascendental de la historia; para el proyecto de investigación es fundamental iniciar destacando la importancia global de la generación de energía eléctrica.

La energía eléctrica, se ha consolidado como un factor decisivo para mejorar la calidad de vida, en la medida en que fortalece la productividad económica, es fundamental para la educación, alimentación, salud e igualdad entre géneros; a pesar de ser ésta el resultado de un proceso de conversión de energía, causa un impacto en el medio ambiente. Los factores anteriores constituyen una sinergia base para el progreso humano, formada por: energía, desarrollo y medio ambiente. Si bien parece que cada una de estas actividades fuese independiente, es claro que la carencia de energía limita las oportunidades de desarrollo y por lo tanto reduce la calidad de vida, en tal sentido, es fundamental comprender que es importante tener acceso a la energía eléctrica generada con fuentes de bajo impacto ambiental; sin embargo, en la actualidad la mayoría de personas de bajos ingresos no tiene acceso a ella, por tal motivo recurren a energéticos sustitutos como la biomasa, deteriorando consigo fuentes hídricas; y, cuando tienen acceso a la energía eléctrica, lo hacen a unos costos considerables, tanto que utilizan una gran proporción de sus ingresos, lo que acentúa la inequidad social. Esta obvia preocupación mundial lamentablemente no fue incluida dentro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) aunque ciertamente es un prerequisite para el logro de ellos; sin embargo, sí es una meta establecida en la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible (CMDS), de Johannesburgo, 2002 [13].

- *El aprovechamiento del agua*

En Ecuador los principales usos productivos del agua son la agricultura, consumo humano y con un 76.3% la generación hidroeléctrica según el Balance Energético

Nacional del año 2019. El agua en Ecuador es un recurso natural limitado. Con el rápido incremento de la población y los niveles de desarrollo que ha ocurrido en los últimos años, se ha puesto de claro manifiesto esta escasez, debido a que el crecimiento socioeconómico genera un aumento significativo de la demanda del recurso hídrico, convirtiéndose en muchos casos en un factor limitante para el crecimiento de la generación hidráulica, a lo anterior, se han sumado los problemas de falta de agua producto de las sequías que han afectado al país durante los años pasados. Todo esto, ha llevado a que este tema sea un problema de constante preocupación nacional y es una de las variables más importantes, parte de este estudio analiza el caudal del agua, entonces la intención es aprovechar al máximo este recurso en la generación de electricidad.

- *La eficiencia en la generación hidroeléctrica*

Si bien los aumentos temporales en el suministro de energía pueden causar una disminución de la tarifa a corto plazo o la estabilidad de la misma, la perspectiva a largo plazo es que los costos de energía continúen aumentando, lo que es particularmente cierto en el caso de la energía eléctrica, donde los costos están asociados a la inversión de construcción de las instalaciones de nueva generación con el costo óptimo para producir la electricidad. El impacto de un aumento en los costos de energía se puede ver fácilmente al examinar los cronogramas de tarifas para las diversas fuentes de combustible, sin embargo, pocos gerentes se toman el tiempo de leer detenidamente y comprender la facturación de sus servicios públicos. En generación hidroeléctrica para el caso particular de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2 se tiene que su valor unitario es igual a los costos fijos más los costos variables dividido para el número de KW/h totales; es necesario considerar que, debido al estudio de costos anuales, solamente la no ejecución del costo podría entenderse como un superávit en términos económicos, pero esto en realidad no se da en la práctica, la ARC (Agencia de Regulación) lleva un control periódico, para el caso de análisis se consideró un año completo y corresponde al año 2020, como se indica en la siguiente tabla:

TABLA 2
COSTOS DE PRODUCCIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ILLUCHI N° 2

	VALOR (USD)	COSTO UNITARIO (USD)
COSTOS FIJOS	247346,75	0,010
COSTOS VARIABLES	742040,25	0,028
TOTAL PRODUCCIÓN CON PÉRDIDAS	989387,00	0,038
	CON PÉRDIDAS	SIN PÉRDIDAS
TOTAL KWh ANUAL	26.036,50	27.182,11
INDICADOR FACTOR DE PLANTA AÑO 2020	0,66	0,69

Elaborado por: Autores.

La planta física es a menudo la categoría de costo más grande, debido a que las plantas de energía eléctrica se han vuelto tecnológicamente más sofisticadas con más requisitos de control de la contaminación, el costo de construir y operar una instalación de generación de energía eléctrica continúa aumentando. Además, la empresa de servicios públicos debe tener la capacidad suficiente para satisfacer las necesidades mínimas de sus clientes mientras mantiene algunos equipos en reserva en caso de fallas en el equipo, de lo contrario pueden ocurrir fallas o incluso apagones. Esta capacidad adicional se puede proporcionar con nuevas y costosas instalaciones de generación. Alternativamente, en lugar de construir nuevas instalaciones, muchas empresas de servicios públicos exhortan a sus clientes a reducir su demanda máxima para que las instalaciones existentes proporcionen capacidad suficiente [14].

- *Las pequeñas centrales de generación hidroeléctrica*

El Ecuador, debido a su ubicación geográfica, cuenta con un sin número de fuentes de agua localizadas en las estribaciones de la cordillera de los Andes, muchas de las cuales poseen caudales más o menos constantes a lo largo del año. Considerando que la energía hidroeléctrica es en la actualidad la que mayor factor de rendimiento presenta con respecto a otras fuentes de energías renovables, el Ecuador se puede considerar un país privilegiado para el desarrollo de plantas hidroeléctricas a pequeña escala, como una alternativa para la mejora de la calidad de vida de los habitantes de comunidades rurales. La implementación de micro y mini centrales hidroeléctricas en zonas rurales permitirá, además de acceder a la energía eléctrica en algunas

comunidades, generar recursos adicionales para los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs) seccionales (municipios y juntas parroquiales), permitiendo la mejora de la calidad de vida de sus habitantes.

En la actualidad, nuestro país cuenta con centrales hidroeléctricas de grande y mediana escala, que son complementadas con el aporte de centrales térmicas, todas ellas aportando al Sistema Nacional Interconectado (SNI). El Ecuador, debido a su ubicación geográfica, cuenta con un sin número de fuentes de agua localizadas en las estribaciones de la cordillera de los Andes, muchas de las cuales poseen caudales más o menos constantes a lo largo del año.

Es de conocimiento general que la micro generación hidroeléctrica (MicroCHE) juega un papel importante en el desarrollo de zonas rurales y de zonas no interconectadas al sistema energético nacional (ZNI). Por lo tanto, satisfacer los requerimientos de energía eléctrica para las ZNI encuentra altas posibilidades en la medida en que se utilicen recursos hidro energéticos en pequeña escala, los cuales se caracterizan por tener un impacto ambiental positivo en la medida en que obliga a preservar la cuenca, son compatibles con acueductos para agua potable y regadío, entre otros. Sin embargo, los equipos para MicroCHE a la vez que son importados, usualmente sus potencias no se ajustan a las condiciones de caudal y altura del lugar; esto hace que sean una solución costosa e ineficiente [15].

- Central hidroeléctrica

Las centrales hidroeléctricas son aquellas que utilizan la energía hidráulica para la generación de energía eléctrica, las mismas aprovechan las masas de agua en movimiento, dependen de un embalse de agua contenido por una presa, siendo el nivel de agua máximo la capacidad límite del tanque de presión y el mínimo corresponde al nivel de la bocatoma donde se realiza la descarga a la tubería de presión, para luego ser transportada por tuberías forzadas controladas con válvulas para apertura y cierre del flujo de agua.

El agua en su caída pasa por una turbina hidráulica haciendo que gire su eje y transformando la energía potencial de la caída del agua en energía mecánica giratoria, el eje de la turbina está conectado a un generador y le trasfiere su energía mecánica rotatoria, transformándose en energía eléctrica. Según la potencia instalada, las centrales hidroeléctricas pueden ser:

- Centrales hidroeléctricas de gran potencia: más de 10MW de potencia eléctrica.
- Minicentrales hidroeléctricas: entre 1MW y 10MW.
- Microcentrales hidroeléctricas: menos de 1MW de potencia [16].

- Componentes de una central hidroeléctrica

a) Presa: Se construye en algunos ríos para contener el agua y almacenarla en un embalse y retener su caudal, para luego regular el agua y dirigirla hacia las tuberías de presión. Debe estar construida para resistir las fuerzas que se ejercen sobre ella.

Por su operación las presas pueden ser de acumulación y de paso, esto dependerá de la capacidad de agua que tenga la presa para su almacenamiento y regulación.

b) Compuertas: Se utilizan para abrir y cerrar las conducciones de agua, canales y tuberías, así como para regular el caudal de agua, son de mucha utilidad para realizar operaciones de mantenimiento a la represa.

c) Vertederos: Son elementos fundamentales que permiten descargar el excedente de agua (derrame) para que no se presenten daños en la presa, la central eléctrica ni la ribera del río delante de la presa.

d) Tuberías de presión: Las tuberías de presión tienen por objetivo conducir el agua desde la cámara de presión hacia la casa de máquinas donde se encuentra la cámara de distribución.

e) Turbinas: La turbina es un dispositivo mecánico capaz de convertir la energía del agua (potencia hidráulica) en energía mecánica (potencia en el eje), el trabajo mecánico fundamental de la turbina, es la de hacer girar al

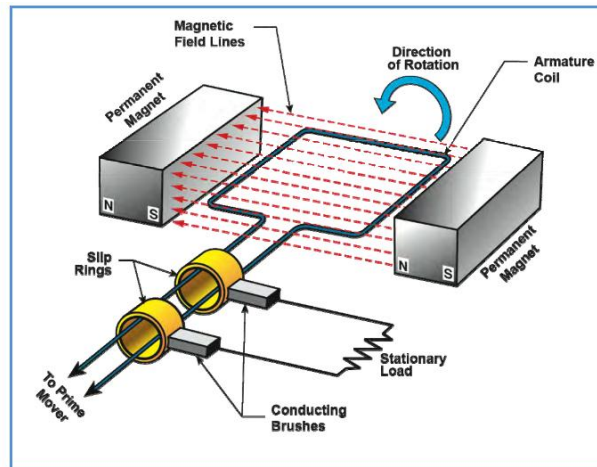
rotor del generador. Se clasifican en 3 tipos:

- Turbinas PELTON: Son adecuadas para los saltos de gran altura y para los caudales relativamente pequeños. La forma de instalación más habitual es la disposición horizontal del eje, conocidas también como turbinas de acción [16].
 - Turbinas FRANCIS: Se pueden usar en saltos de diferentes alturas dentro de un amplio margen de caudal, son de rendimiento óptimo cuando trabajan en un caudal entre el 60 y el 100% del caudal máximo, en general, la disposición más habitual que se puede instalar es en la de eje vertical. Conocidas también como turbinas de reacción [16].
 - Turbinas KAPLAN: Son turbinas de admisión total y de reacción. Se usan en saltos de pequeña altura con caudales medianos y grandes. Normalmente se instalan con el eje en posición vertical, pero también se pueden instalar de forma horizontal o inclinada [16].
- f) Generador eléctrico: Los generadores eléctricos tienen la finalidad de transformar la energía mecánica en energía eléctrica, el principio de funcionamiento se basa en la Ley de Faraday, que manifiesta, para que se genere una corriente eléctrica debe haber un movimiento entre el conductor y el campo magnético, el voltaje inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie cualquiera con el circuito como borde [17].

Los generadores eléctricos tienen bobinados de campo y armadura. La energía mecánica se convierte en energía eléctrica a través del movimiento relativo de estos dos devanados. El principio de la generación de C.A. ahora se describe utilizando un alternador que incorpora un devanado de inducido rotativo y un devanado de campo estacionario. Con esta comprensión básica, el siguiente paso es describir la práctica de utilidad común, usando un devanado de campo giratorio y un devanado de

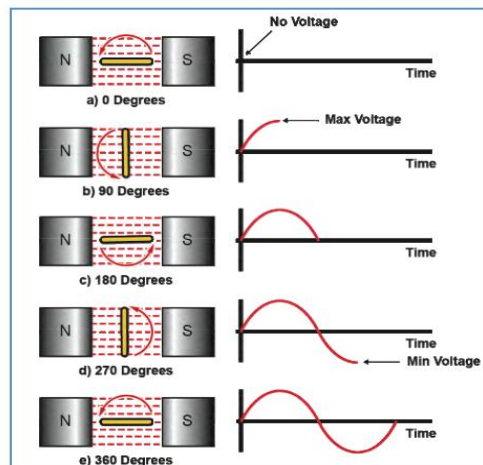
inducido estacionario para crear energía de C.A. [17].

La Figura 1, ilustra una máquina primaria de 1Φ AC. Esta máquina consta de un conductor (armadura) que gira a través de un campo magnético. La ruta del campo magnético se encuentra entre los polos magnéticos norte y sur de un imán permanente. Recuerde que un campo magnético está compuesto por líneas de flujo magnético que fluyen entre los polos norte y sur. Cuando la bobina del inducido se coloca en un campo magnético, las líneas de flujo magnético atraviesan la bobina del inducido. Se induce un voltaje en la bobina del inducido a medida que cambia la cantidad de flujo magnético que atraviesa la bobina. La cantidad de voltaje inducida en la bobina del inducido es directamente proporcional a la velocidad a la que cambia el flujo que pasa a través de la bobina [17].



*Fig. 1. Armadura giratoria con devanado de campo estacionario.
(Fuente: [17])*

Como se ilustra en la Figura 1, la armadura tiene forma física y gira de tal manera que en la posición horizontal (Figura 2(a)) la armadura no está cortando ninguna línea del flujo magnético. Como los enlaces de flujo no cambian, no se genera voltaje en esta posición. A medida que la armadura gira en sentido antihorario, más y más líneas del flujo magnético atraviesan la armadura. Se alcanza un voltaje máximo cuando la armadura está en posición vertical. Figura 2(b) [17].



*Fig. 2. Rotación de armadura y producción de voltaje.
(Fuente: [17])*

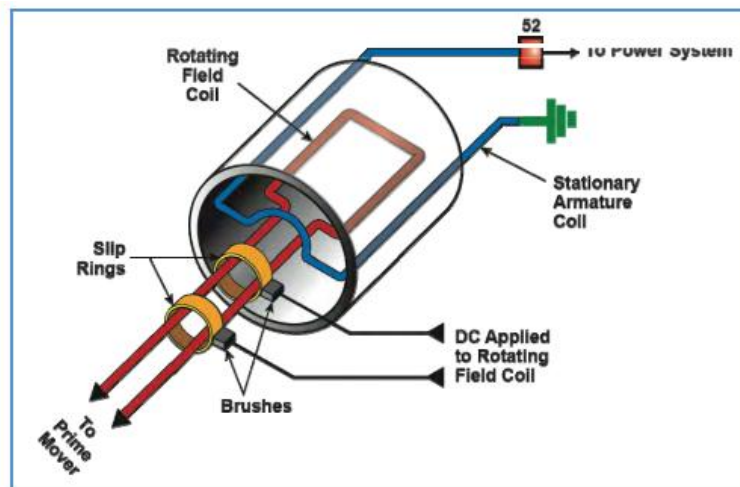
A medida que la armadura continúa girando más allá de la posición vertical, el voltaje disminuye, llegando a cero cuando el conductor vuelve a alcanzar la posición horizontal. Figura 2 (c). Cuando el conductor ha terminado una rotación completa (360°), se genera una onda sinusoidal de voltaje de C.A. completa como se ilustra en la Figura 2 (e). Para transferir la corriente de carga de la armadura giratoria a una carga no giratoria, la bobina de la armadura termina en anillos colectores (ver Figura 1). Los cepillos conductores se utilizan para suministrar corriente de carga desde los anillos colectores a la carga. Estos cepillos se montan en la superficie lisa de los anillos colectores [17].

- *Escala de utilidad de los generadores de energía*

El generador de C.A. elemental en la Figura 1 no es práctico para grandes cantidades de generación de energía. Las corrientes de carga de C.A. en generadores de energía grandes son demasiado grandes para usar anillos colectores. Para eliminar los anillos colectores en la ruta de la corriente alterna de salida, un generador de energía utiliza un campo magnético giratorio producido alrededor del rotor y un estacionario bobina de armadura integrada en el estator. Esto es lo opuesto a la configuración de la máquina simple en la Figura 1 [17].

El campo magnético del generador se produce al ejecutar una corriente de C.C. (llamada corriente de excitación) a través de los devanados de campo que están incrustados en el rotor. Esta corriente continua convierte el rotor en un electroimán. La intensidad del campo magnético del generador se puede cambiar ajustando la cantidad de corriente C.C. que fluye a través del devanado de campo [17].

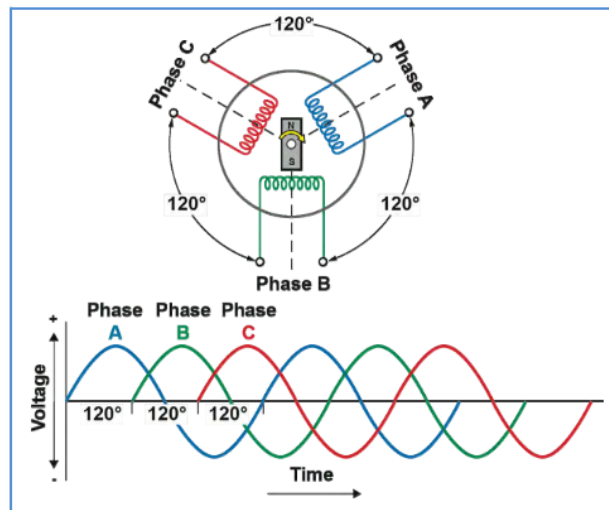
El rotor está conectado a un motor principal, como una turbina de vapor o agua. El motor principal proporciona la potencia de entrada mecánica para girar el rotor del generador. Cuando el rotor gira, se crea un campo magnético giratorio alrededor del rotor. Este campo induce un voltaje de C.A. en la bobina del inducido que está incrustado en el estator. La Figura 3 ilustra el proceso utilizado para producir electricidad en un generador de energía típico. La bobina de campo giratoria induce un voltaje de C.A. en la bobina de armadura estacionaria. La corriente de excitación se proporciona al devanado de campo giratorio a través de un conjunto de cepillo y anillo deslizante [17].



*Fig. 3. Generador de corriente alterna monofásico.
(Fuente: [17])*

Los generadores de energía grandes son generadores 3Φ , no 1Φ como se ilustra en las Figuras 1 y 2. Los generadores trifásicos tienen tres

conjuntos de devanados del estator (armadura), uno para cada fase. Cada uno de los juegos de bobinado del estator produce una onda sinusoidal de voltaje. Cada voltaje de fase tiene una separación de ángulo de fase de 120° de los otros dos voltajes de fase. El diseño conceptual de un generador 3Φ y sus voltajes de salida se ilustran en la Figura 4 [17].



*Fig. 4. Generador de corriente alterna trifásico
(Fuente: [17])*

Hay dos tipos generales de máquinas de C.A.: síncronas y asíncronas. Los términos síncrono y asíncrono se refieren a la relación entre la velocidad de rotación del rotor de la máquina y la velocidad del sistema de potencia. La velocidad del sistema de potencia (o velocidad síncrona) es la velocidad de rotación del sistema eléctrico de C.A. al que se conecta el generador [17].

- g) Cojinetes: En una unidad de generación son elementos principales utilizados para soportar los elementos móviles de un elemento fijo, están compuestos por un cojinete guía y un cojinete de empuje, el guía es el encargado de soportar cargas radiales y mantener al eje centrado, mientras que de empuje transmite las cargas axiales del eje al soporte de la máquina y la película de aceite conforma el lubricante y refrigerante durante el movimiento.

- h) Excitatriz: Es la máquina encargada de suministrar la corriente y voltaje de excitación a las bobinas del rotor, lugar donde se genera el campo magnético para el generador.
- i) Transformadores y líneas de transmisión: Los transformadores que conectan la fuente de poder (generadores) y el circuito receptor (línea de transmisión) elevan el voltaje para transmisión permitiendo reducir las pérdidas eléctricas y reduciendo la sección del conductor en la línea de transmisión.

1.3. Fundamentación metodológica

Actualmente el estudio paramétrico es una técnica ampliamente utilizada en distintos campos de la ciencia para facilitar el entendimiento de un fenómeno o proceso para su posterior optimización.

En el campo de la hibridación energética el estudio paramétrico ha permitido recomendar una configuración óptima para un sistema energético eólico, solar y a diésel [18], en generadores lineales el análisis de parámetros tiene como fin la optimización del rendimiento de un sistema de conversión de energía de onda de generador lineal [19], y en el área de la turbomaquinaria el estudio paramétrico se ha utilizado para reducir la erosión en las turbinas Francis [20].

Los proyectos citados previamente son algunos ejemplos de las aplicaciones que se pueden desarrollar mediante el análisis paramétrico, así mismo validan la viabilidad de desarrollar el presente proyecto de investigación aplicando la parametrización para la evaluación de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.

- Tipo de investigación

De acuerdo con Hernández, Fernández & Baptista, y Castellero [21], [22], existen algunos tipos de investigación que se clasifican según:

- a) El objetivo de la investigación.

- b) El nivel de profundización en el objeto de estudio.
- c) El tipo de datos empleados.
- d) El grado de manipulación de las variables.
- e) El tipo de inferencia.
- f) El período temporal en que se realiza.

A continuación, se detallan los tipos de investigación a los cuales pertenece el presente proyecto de investigación en función de la clasificación antes mencionada.

Según el objetivo de la investigación, el proyecto pertenece a la **investigación aplicada**, su finalidad es la parametrización de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2 para su posterior optimización en base a la evaluación del estado actual de la misma. Es decir, la investigación tiene un objetivo concreto, un alcance delimitado y una aplicación práctica.

Según el nivel de profundización en el objeto de estudio, pertenece a la **investigación explicativa**, debido a que en el presente proyecto se busca aplicar la parametrización para entender completamente el fenómeno de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2 para poder identificar las variables cuya influencia es significativa y en base a esto optimizar el proceso.

Según el tipo de datos empleados, pertenece a la **investigación cuantitativa**, el estudio paramétrico entregará datos medibles que permitan realizar análisis de sensibilidad de las variables para determinar su influencia en el fenómeno de generación. La cuantificación de las variables y su influencia facilitará la toma de decisiones.

Según el grado de manipulación de las variables, pertenece a la **investigación cuasiexperimental**, el estudio paramétrico pretende analizar y manipular algunas variables concretas del fenómeno de generación en la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2, pero no se posee control total sobre dichas variables.

Según el tipo de inferencia, pertenece a la **investigación de método hipotético – deductivo**, esto debido a que en la formulación del problema del presente trabajo de

investigación se propone una hipótesis que se pretende comprobar o descartar en función de los resultados que se obtendrán al final de este trabajo.

Según el período temporal en el que se realiza, pertenece a la **investigación transversal**, debido a que una vez desarrollado el modelo paramétrico se realizará la variación de los parámetros influyentes del fenómeno para analizar los resultados que estos cambios producen y poder de esta manera identificar y proponer la solución que permita optimizar el proceso de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.

- Métodos de investigación

Los métodos de investigación se clasifican en [23]:

- a) Cuantitativos.
- b) Cualitativos.
- c) Mixtos (cualitativos y cuantitativos).

En el presente proyecto de investigación se aplica el método de investigación cuantitativo, se busca medir las variables influyentes del fenómeno de generación en la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2 y el análisis de los datos se realizará aplicando un modelo paramétrico del fenómeno de estudio.

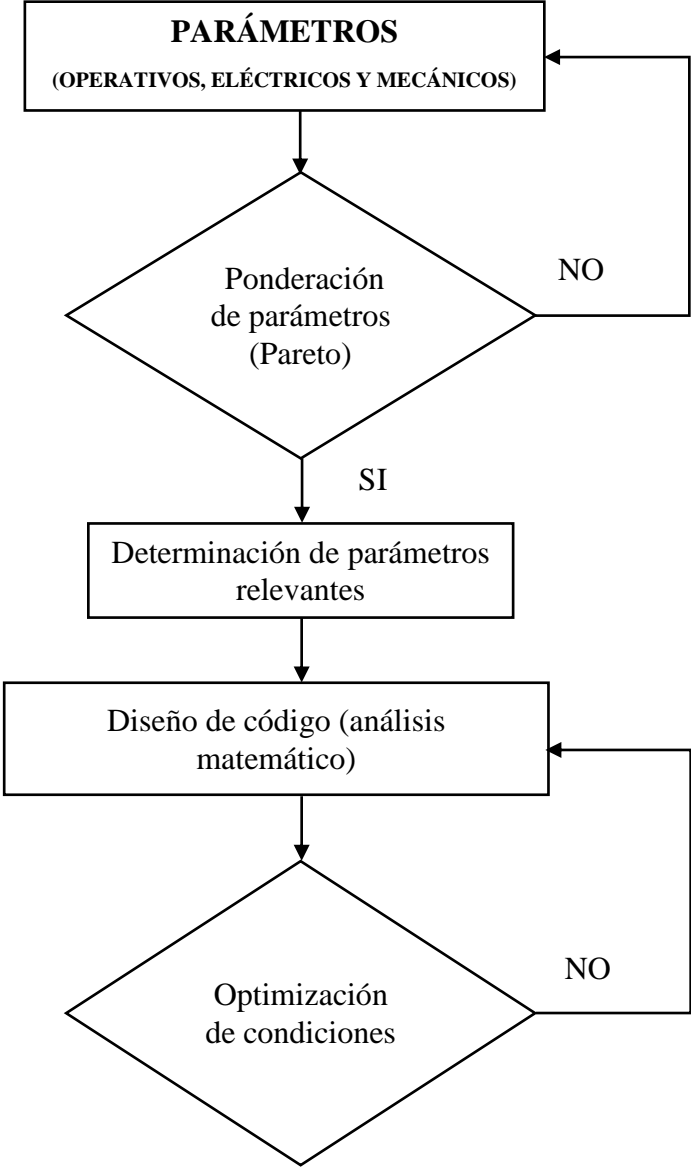
Dentro del método cuantitativo se aplicará el método experimental, el mismo que hace referencia a la manipulación de una o más variables del fenómeno para determinar cómo esta manipulación afecta el resultado del proceso de generación con la finalidad de obtener la combinación de variables que permita una operación óptima en la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.

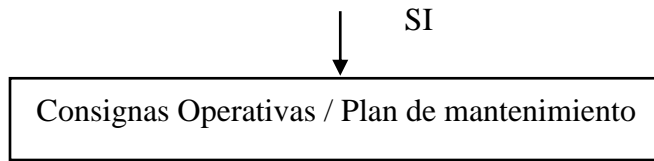
- Técnicas e instrumentos

Las técnicas son el conjunto de reglas o procedimientos que permiten al investigador establecer la relación con el objeto de la investigación, mientras que los instrumentos son los mecanismos que se utilizan para recolectar y registrar la información [24].

En el presente trabajo de investigación la información proviene tanto de fuentes primarias (documentos originales, fotografías, informes técnicos de mantenimientos y

registros de datos históricos sobre la operación de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2 y medición de las variables in situ) y de fuentes secundarias (información de libros y artículos que interpretan sobre la operación de la central hidroeléctrica). Los instrumentos que se utilizarán en el presente proyecto de investigación son [25]: Instrumentos de registro: hojas de registro, documentos físicos y digitales. Instrumentos de medición: tablero de control e instrumentos de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2. Para el presente análisis se seguirá la siguiente metodología:





*Fig. 5. Diagrama de flujo del proceso.
(Fuente: propia)*

1.4. Conclusiones:

- Al desarrollar el marco teórico del capítulo 1, permite el ordenamiento lógico y secuencial de los temas teóricos procedentes de la información obtenida de las fuentes bibliográficas fidedignas, bitácoras de operación y mantenimiento, datos técnicos de los equipos de la Central Hidroeléctrica Illuchi N°2, que giran alrededor del planteamiento del problema y que sirven de base, fundamentación y análisis para proponer soluciones del proyecto de investigación planteado.
- Al investigar se puede definir y delimitar según el criterio la fundamentación teórica de conceptos involucrados con las variables de investigación, que forman parte del presente estudio, para la utilización de los parámetros de operación que influyen en la eficiencia de las unidades de generación.
- La Fundamentación metodológica para el desarrollo del presente proyecto de investigación es muy necesario porque reúne los requerimientos indispensables, mediante la aplicación de los tipos y métodos de investigación que van de la mano con las técnicas e instrumentos que se van aplicar.

CAPÍTULO II

2.1. Título del proyecto:

Desarrollar un modelo paramétrico para la evaluación de operación de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.

2.2. Objetivo del proyecto:

- Determinar una base teórica con ecuaciones necesarias para el modelamiento paramétrico de las variables de análisis.
- Establecer una metodología que permita obtener un diseño paramétrico, para mejorar la eficiencia y rendimiento en función de los parámetros operacionales de las unidades de generación y con ello poder tener una mayor rentabilidad de la central.

2.3. Justificación

La operación de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2, actualmente se ve afectada por la falta de procedimientos y condiciones de operación, por la escasez de información y datos de diseño lo que ha provocado que disminuya la eficiencia de la central y no se aproveche de buena manera el recurso hídrico, por tal razón se ha seleccionado los parámetros de mayor impacto para la evaluación según el modelo paramétrico que mediante PARETO se discriminó del universo de parámetros los necesarios, donde el 20% de los parámetros afectan al 80% de los problemas de eficiencia operativa de la central mediante un análisis estadístico como se puede ver en el anexo 1.

Para iniciar con el modelamiento se consideró que, las condiciones principales de operación de la turbina son:

- Área de la tubería
- Caudal
- Altura neta
- Ángulo Beta de la turbina

Estos parámetros serán nombrados como parámetros de operación, en la transformación de la energía cinética a energía mecánica se calcularán los parámetros que inciden en forma directa en las tuberías de presión, a los cuales se denominará parámetros mecánicos, en la transformación de la energía mecánica a eléctrica se calcularán los parámetros de pérdidas en el núcleo y en el bobinado de los generadores, excitatriz y transformador, a los cuales se les nombrará parámetros eléctricos, los parámetros mencionados nos ayudará a obtener la potencia final a la cual se mencionará como parámetro de eficiencia, el mismo que ayudará a evaluar la eficiencia de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.

Para el cálculo matemático los investigadores han considerado utilizar el software Engineering Equation Solver **EES**, versión estudiantil 64 bits, debido a la flexibilidad y a todas las ventajas como: velocidad de resolución, análisis de unidades, estudios paramétricos, prestaciones operativas y fundamentalmente por la relación que tiene con termodinámica, mecánica de fluidos y turbomáquinas, de lo cual otros aplicativos y software no disponen.

2.4. Descripción de la propuesta:

La Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2, es una central de caudal de paso y está compuesta de dos turbinas marca Bell, tipo Pelton, que accionan dos generadores marca BBC que funcionan a un voltaje de 2400 voltios. La potencia total instalada es de 6.5 MVA distribuida en dos grupos de 3250 kVA a 720 rpm. La subestación de elevación está formada por un transformador de 6.5 MVA con un voltaje de 2.4/13.8 kV y que se enlazan al sistema nacional interconectado, mediante una línea trifásica

de transmisión de 13.8 kV (ver anexo 2), la misma que está conformada por conductores N° 466 MCM ACSR, estructuras de hormigón tipo 3 CP y tiene una longitud de 10 km desde la subestación de la central hasta la S/E El Calvario, a continuación, se detalla los datos generales de la central hidroeléctrica:

TABLA 3.
DATOS GENERALES DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ILLUCHI N° 2

Ubicación:	-Parroquia: Juan Montalvo, Pusuchusí Alto
	-Cantón: Latacunga
	-Coordenadas: 772916,60 E 9896516,29 N
Fecha de puesta en servicio:	-Año: 1984
	-Voltaje de Generación: 2400 V nominal
Niveles de tensión que opera:	-Voltaje ingreso Subestación: 2400 V nominal
	-Voltaje salida Subestación: 13800 V (13.8 KV)
	-Voltaje servicio de auxiliares: 220VAC / 125 VDC

Fuente: Elaboración Propia.

Este documento ofrece un estudio investigativo del efecto de los parámetros de operación, mecánicos, eléctricos y de eficiencia de los generadores marca Brown Boveri Company, modelo WA 111-63-10 en el rendimiento general de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2, que utiliza 2 turbinas Pelton de eje horizontal.

En la curva de capacidad disponible como referencia de los generadores síncronos similares a los de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2 (ver anexo 3), se observan básicamente los parámetros de operación (voltaje y corriente del estator y corriente de campo magnético), donde se ve el comportamiento de los generadores con sus límites de saturación en los bobinados, que para el caso de estudio se tomaron estos valores para los parámetros y variables para utilizar en el cálculo.

Para desarrollar la metodología del diseño paramétrico para la evaluación de operación de los generadores hidroeléctricos, se ha investigado aplicaciones en donde las ecuaciones teóricas han sido desarrolladas para evaluar las condiciones de eficiencia. A continuación, se presenta el procedimiento que se va a utilizar para realizar el trabajo investigativo.

2.5. Pérdidas mecánicas y eléctricas

2.5.1. Pérdidas mecánicas

El fluido en un sistema de tubería típico pasa a través de varias uniones, válvulas, flexiones, codos, ramificaciones en forma de letra T (conexiones en T), entradas, salidas, ensanchamientos y contracciones además de los tubos. Dichos componentes (accesorios) interrumpen el suave flujo del fluido y provocan pérdidas adicionales debido al fenómeno de separación y mezcla del flujo que producen [26].

A continuación, se presentan las principales ecuaciones que se van a utilizar en el trabajo de investigación:

- **Ecuación para el cálculo del área [26]**

La sección transversal es la sección de un cuerpo perpendicular a su eje predominante, generalmente si el cuerpo es cilíndrico (cables, tuberías, barras, tanques de esa forma, etc.) es el círculo perpendicular al eje de simetría. Se halla calculando el área de la sección según su forma y/u dimensiones:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (1)$$

Donde:

A = Área de la sección.

π = PI que hace referencia al número 3.1416.

D = Diámetro de la tubería.

- **Ecuación de continuidad**

Es el producto de la sección transversal del flujo y la velocidad promedio del flujo permanece constante a través del canal [26].

$$Q = V * A \quad (2)$$

Donde:

Q = Caudal.

V = Velocidad del flujo.

$A = \text{Área de la sección.}$

- **La Ecuación de Conservación de Masa, de Bernoulli y de Energía**

Esta **ecuación de Bernoulli**, la cual es de uso común en mecánica de fluidos para el flujo estacionario e incompresible, a lo largo de una línea de corriente, en las regiones no viscosas del flujo. El valor de la constante puede evaluarse en cualquier punto de la línea de corriente en donde se conozcan la presión, densidad, velocidad y elevación. La ecuación de Bernoulli también puede escribirse entre dos puntos cualesquiera sobre la misma línea de corriente como [26]:

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

La ecuación de Bernoulli se simplifica de la siguiente manera teniendo en cuenta que la presión abierta a la atmósfera es 0 ($P_1 = P_{atm}$; $P_2 = P_{atm}$), el tanque es grande en relación con la salida $V_1 \cong 0$, y la altura $Z_2 = 0$, donde queda:

$$Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} \quad (4)$$

Si se despeja V_2 y se sustituye:

$$V_2 = \sqrt{2gZ_1} \quad (5)$$

- **La Ecuación de Darcy-Weisbach**

La ecuación de Darcy-Weisbach, es válida para cualquier flujo de tubería: si la tubería es horizontal o en una inclinación. Parte del cambio de presión se debe al cambio de elevación y parte se debe a la pérdida de carga asociada con efectos de fricción, que se dan en términos del factor de fricción, f [27]. A continuación, las ecuaciones [26]:

- a) Pérdidas mayores.**

$$\begin{aligned} h_{L,mayor} \\ = \sum f_i \frac{L_i V_i^2}{2g} \end{aligned} \quad (6)$$

Donde:

$h_{L,mayor}$ = Pérdidas mayores (Pérdida de carga debida a la fricción).

i = Representa cada tramo de tubería con diámetro constante.

f = Factor de fricción.

L = Longitud de la tubería.

D = Diámetro interno de la tubería.

V = Velocidad media del fluido.

g = Gravedad.

b) Pérdidas menores.

$$h_{L,menor} = \sum_j K_{L,j} \frac{V_j^2}{2g} \quad (7)$$

Donde:

$h_{L,menor}$ = Pérdidas menores.

j = Representa cada accesorio que provoca una pérdida menor.

K_L = Coeficiente de pérdida representativo.

V = Velocidad media del fluido.

g = Gravedad.

c) Pérdida de carga total (general)

$$h_{L,total} = h_{L,mayor} + h_{L,menor} \quad (8)$$

$$h_{L,total} = \sum_i f_i \frac{L_i V_i^2}{D_i 2g} + \sum_j K_{L,j} \frac{V_j^2}{2g} \quad (9)$$

• **Ecuación de Osborne Reynolds.**

Osborne Reynolds descubrió que el régimen de flujo depende principalmente de la razón de *fuerzas inerciales* a *fuerzas viscosas* en el fluido. Esta razón se llama número de Reynolds y se expresa para flujo interno en una tubería circular como [26]:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{V_{prom}D}{\nu} = \frac{\rho V_{prom}D}{\mu} \quad (10)$$

Donde:

Re = Número de Reynolds.

ρ = Densidad del fluido.

V_{prom} = Velocidad de flujo promedio en m/s.

D = Diámetro interno de la tubería en m.

μ = Viscosidad cinemática del fluido.

- **Ecuación De Colebrook.**

En 1939, Cyril F. Colebrook (1910-1997) combinó los datos disponibles para flujo en transición y turbulento en tuberías lisas y rugosas en la siguiente relación implícita conocida como ecuación de Colebrook [26]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (\text{flujo turbulento}) \quad (11)$$

Donde:

f = Factor de fricción.

ε/D = Rugosidad relativa.

Re = Número de Reynolds.

- **Ecuación para cálculo de la potencia en el eje.**

La potencia de salida depende del caudal y la velocidad del chorro a la salida de la boquilla, ambos dependen del diámetro de la boquilla y la pérdida de carga asociado con la tubería de suministro. Eso es [27]:

$$W_{shaft} = \rho Q U (U - V_1) (1 - \cos\beta) \quad (12)$$

Donde:

W_{shaft} = Potencia en el eje.

ρ = Densidad del fluido.

- Q = Caudal.
 U = Velocidad lineal.
 V_1 = Velocidad proveniente del inyector.
 β = Ángulo del borde de salida de la hoja.

2.5.2. Pérdidas en el núcleo

Las pérdidas en el núcleo son las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas que se presentan en el material magnético del motor. Estas pérdidas, varían conforme al cuadrado de la densidad de flujo (B_2) y, en el estator, conforme a la 1.5ava potencia de la velocidad de rotación de los campos magnéticos ($n^{1.5}$) [28].

A continuación, se presentan las ecuaciones que se van a utilizar con su respectivo autor:

- a) Pérdidas por histéresis magnética se obtiene aplicando la fórmula de Steinmentz indicada a continuación [29]:

$$Ph = Kh * f * \beta_{max}^n \quad (13)$$

Donde:

Ph = Pérdidas por histéresis en w/kg

Kh = Coeficiente de cada material.

f = Frecuencia en Hz.

β_{max} = Inducción máxima en Tesla.

n = 1,6 para $\beta < 1$ Tesla.

= 2 para $\beta > 1$ Tesla.

- b) Pérdidas por corrientes de Foucault: se obtienen a partir de la siguiente expresión [29]:

$$Pf = \frac{2,2 * f^2 * \beta_{max}^2 * \Delta^2}{10^{11}} \quad (14)$$

Donde:

P_f = Pérdidas por corrientes de Foucault en w/kg.

f = Frecuencia en Hz.

β_{max} = Inducción máxima en Gauss.

Δ = Espesor de la chapa magnética en mm.

- c) Pérdidas Totales: las pérdidas de potencia en el hierro (P_{FE}) o en el núcleo magnético son la suma correspondiente a las pérdidas por Foucault (P_f) e histéresis (P_h) tal y como, se indica a continuación [29]:

$$Pérdidas Totales en el núcleo (P_t) = $P_t = (P_f) + (P_h)$ (15)$$

2.5.3. Pérdidas eléctricas o pérdidas en el cobre

Las pérdidas en el cobre son producidas por el calentamiento resistivo que se presenta en los devanados del estator (inducido) y del rotor (campo) de la máquina. Las pérdidas de cobre en el estator (PCE) en una máquina de C.A. trifásica están dadas por la ecuación [28]:

$$P_{PCE} = 3I_A^2 R_A$$
 (16)

Donde:

P_{PCE} = Pérdidas de cobre en el estator.

I_A = Corriente que fluye en cada fase del inducido.

R_A = Resistencia de cada fase del inducido.

Las pérdidas de cobre en el rotor (PCR) de una máquina de C.A. síncrona están dadas por la ecuación [28]:

$$P_{PCR} = I_F^2 R_F$$
 (17)

Donde:

P_{PCR} = Pérdidas de cobre en el rotor.

I_F = Corriente que fluye en el devanado de campo en el rotor.

R_F = Resistencia del devanado de campo.

Normalmente, la resistencia que se utiliza en estos cálculos es la resistencia del devanado a una temperatura normal de operación.

2.5.4. Pérdidas dispersas o adicionales

Las pérdidas dispersas son aquellas que no se pueden ubicar en ninguna de las categorías anteriores. Sin importar qué tanta precisión se tenga para considerar las pérdidas, siempre hay algunas que se escapan de las categorías anteriores. Todas estas pérdidas se agrupan en las pérdidas dispersas. Convencionalmente, en la mayoría de las máquinas, las pérdidas dispersas se toman como 1% de la plena carga [28].

2.6. Diagrama de flujo de potencia

Una de las técnicas más convenientes para considerar las pérdidas de potencia en una máquina es el *diagrama de flujo de potencia*. En la figura 6 se muestra el diagrama de flujo de potencia de un generador de C.A. En ésta se suministra potencia mecánica a la máquina y luego se restan las pérdidas dispersas, las pérdidas mecánicas y las pérdidas en el núcleo. Una vez que se han restado estas pérdidas, en situaciones ideales, la potencia restante se convierte de potencia mecánica a eléctrica en el punto llamado P_{conv} . La potencia mecánica que se convierte es igual a [28]:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m \quad (18)$$

y se produce la misma cantidad de potencia eléctrica, sin embargo, ésta no es la potencia que está presente en los terminales de la máquina. Antes de llegar a los terminales, se deben restar las pérdidas eléctricas I^2R [28].

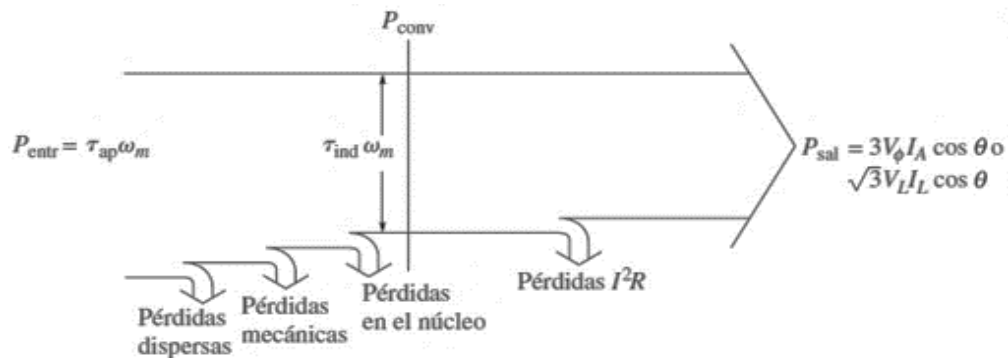


Fig. 6. Diagrama de flujo de potencia de un generador de C.A. trifásico.
(Fuente: [28])

La potencia final obtenida queda representada como se indica en la siguiente ecuación:

$$Potencia_{final} = P_m - P_n - P_e - P_d \quad (19)$$

2.7. Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados.

El programa utilizado para el análisis paramétrico fue desarrollado en la Universidad de Wisconsin-Madison por el departamento de Ingeniería Mecánica a cargo del profesor Sanford A. Klein. Y se denomina Engineering Equation Solver **EES** (Solucionador de ecuaciones de ingeniería), abreviado EES que se considera un programa de resolución de conjuntos de ecuaciones que resuelve de manera eficiente cientos de ecuaciones, se aprovechará principalmente el módulo de funciones matemáticas y termo físicas, se dispone para la investigación una licencia estudiantil V9.944-3D, adquirida en el año 2015, ver en el anexo 4.

Luego de la revisión y análisis de los temas afines a la investigación, se procede a evaluar los parámetros relacionados a la eficiencia hidráulica eléctrica y de la operación de los generadores.

2.7.1. Modelo paramétrico

Para el modelo paramétrico fue necesario recabar mucha información técnica operativa, sin embargo, debido al paso de los años dicha información ya no está disponible, en este caso se carece de planos, fichas técnicas, diagramas, pruebas SAT FAT, etc. Es una desventaja no disponer de datos constructivos o ciertas características del equipamiento necesario para el análisis operacional de la central; por ello se consideró el uso de varias técnicas de campo, mediciones y cálculos para algunos parámetros, por ello se complicó la elaboración del modelo paramétrico para

representar los fenómenos y características específicas de la central, en algunos casos se buscó estandarizar modelos con la reducción de variables y parámetros.

Las variables a analizar fueron escogidas mediante un Diagrama de Pareto, descartando los de menor influencia y considerando únicamente lo que mayor impacto tiene para el análisis y rendimiento en la producción.

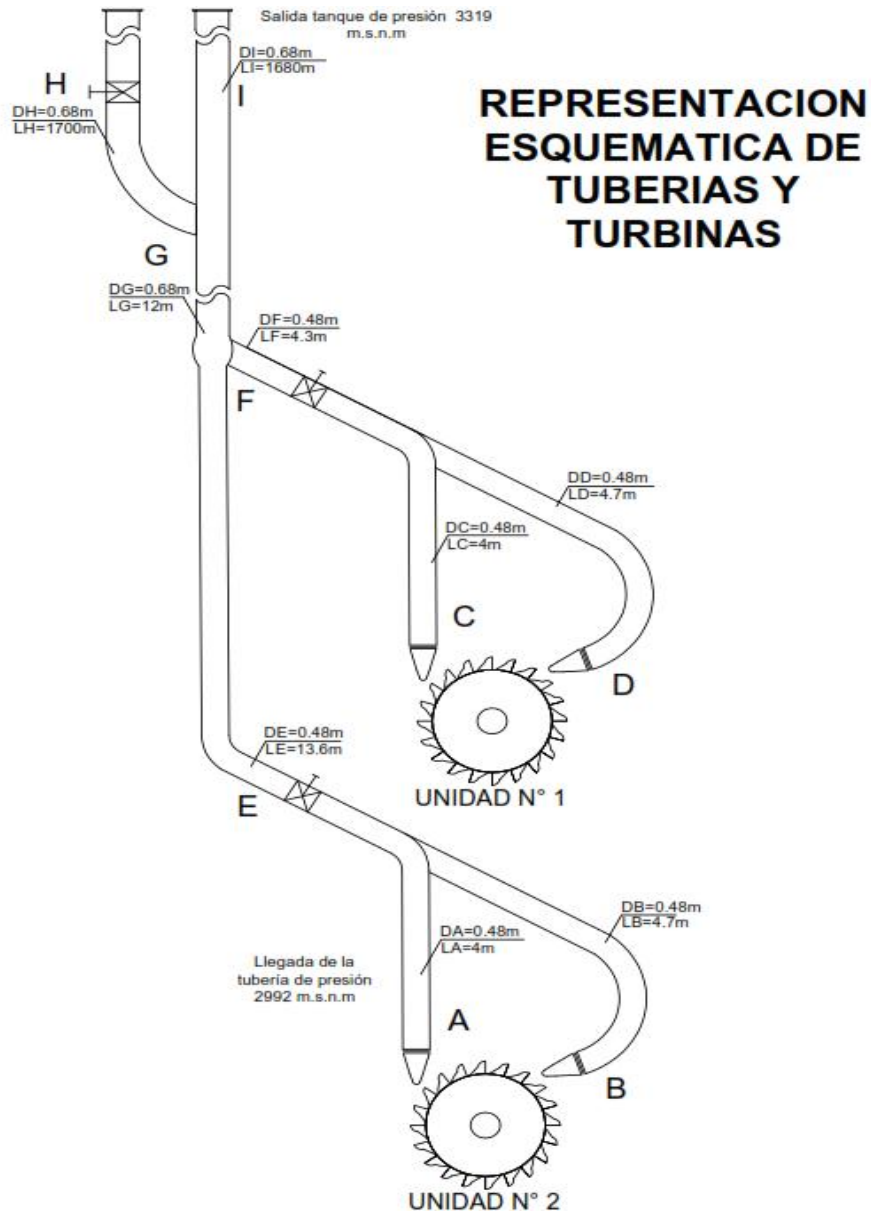


Fig. 7. Representación esquemática de tuberías y turbinas de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.
(Fuente: propia)

Para el análisis de los parámetros y variables se consideró evaluar las siguientes variables que definen las condiciones de operación de mayor incidencia para el caso de estudio:

- Altura neta [m]
- Caudal [m³]
- Apertura del inyector [%]
- Potencia del eje [W]
- Eficiencia [kW]

Con el fin de organizar y sistematizar las variables se usó el esquema como se puede ver en la figura 7, la codificación de variables de acuerdo al requerimiento de cálculos.

El modelo paramétrico considera ejecutar un número finito de parámetros representativos, los mismos que ayudarán a buscar la mejor opción o condición operativa para maximizar la producción y reducción de pérdidas en base a condiciones de operación recomendadas.

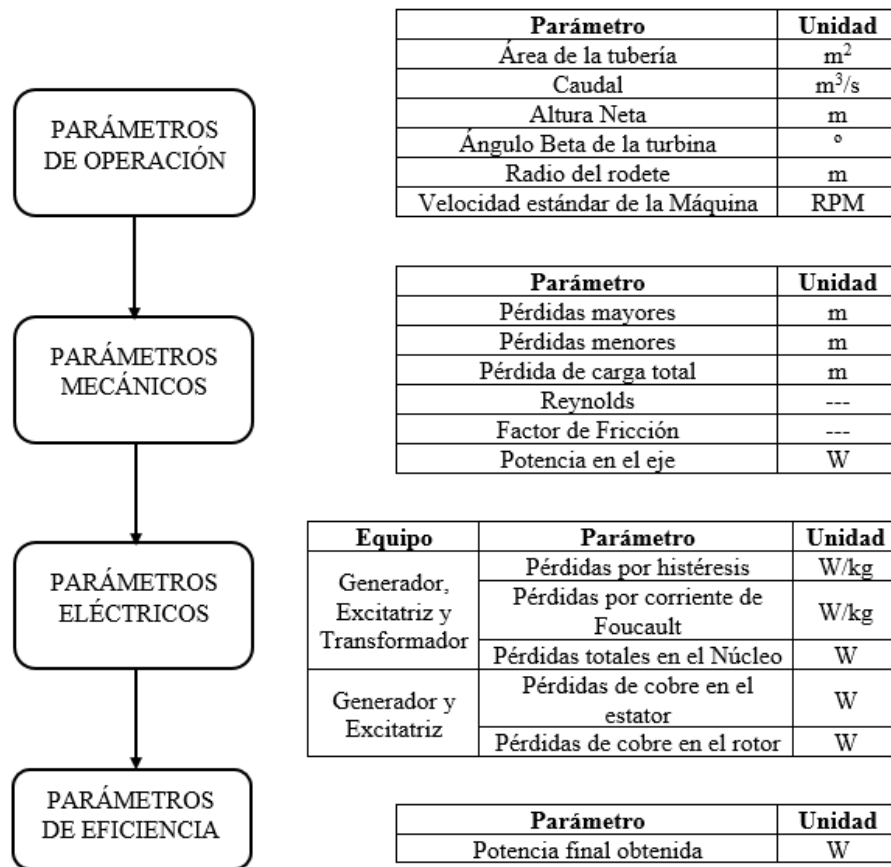


Fig. 8. Estructura de cálculo de parámetros agrupados e individuales.
(Fuente: propia)

Para determinar los parámetros de importancia se emplea el diagrama de Pareto con el cual se determina cuáles son relevantes y no relevantes para el presente caso de estudio. En la figura 8 se muestra el flujo de cálculo de parámetros agrupados e individuales que formarán parte de la metodología.

Los parámetros debido a la condición actual de la central y con la implementación de tecnología el modelo considera como un ingreso/salida al regulador de velocidad y regulador de voltaje, pues al considerarlo hace muy sensible al modelo y lo pone en riesgo, por ello es mejor considerar con un diámetro de salida del inyector.

En la siguiente tabla se indican las ecuaciones a emplearse para el cálculo de los parámetros de la metodología desarrollada:

TABLA 4.

FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DENTRO DE LA METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS
PARAMÉTRICO PARA LA EVALUACIÓN DE OPERACIÓN DE LAS UNIDADES DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL
HIDROELÉCTRICA ILLUCHI N° 2

Parámetro	Unidad	Ecuación	Referencia
Parámetros de Operación			
Área (A)	m ²	$A = \frac{\pi * D^2}{4}$	(1)
Caudal (Q)	m ³ /s	$Q = V * A$	(2)
Altura neta (Z ₁)	m	$Z_1 = \frac{V_2^2}{2g}$	(4)
Ángulo Beta de la turbina	°	Dato
Radio del rodete	m	Dato
Velocidad estándar de la Máquina	RPM	Dato
Parámetros Mecánicos			
Pérdidas mayores	m	$h_{L,mayor} = \sum_i f_i \frac{L_i V_i^2}{D_i 2g}$	(6)
Pérdidas menores	m	$h_{L,menor} = \sum_j K_{L,j} \frac{V_j^2}{2g}$	(7)
Pérdida de carga total	m	$h_{L,total} = h_{L,mayor} + h_{L,menor}$	(8)
Reynolds	--	$Re = \frac{\rho V_{prom} D}{\mu}$	(10)
Factor de Fricción	--	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right)$	(11)
Potencia en el Eje	W	$W_{shaft} = \rho Q U (U - V_1) (1 - \cos\beta)$	(12)
Parámetros Eléctricos			
Pérdidas por Histéresis	W/kg	$P_h = K_h * f * \beta_{max}^n$	(13)
Pérdidas por corriente de Foucault	W/kg	$P_f = \frac{2,2 * f^2 * \beta_{max}^2 * \Delta^2}{10^{11}}$	(14)
Pérdidas totales en el núcleo	W	$P_t = (P_f) + (P_h)$	(15)
Pérdidas de cobre en el estator	W	$P_{PCE} = 3 I_A^2 R_A$	(16)
Pérdidas de cobre en el rotor	W	$P_{PCR} = I_F^2 R_F$	(17)
Parámetros de eficiencia			

Potencia final obtenida	W	$Potencia_{final} = P_m - P_n - P_e - P_d$	(19)
-------------------------	---	--------------------------------------------	------

Fuente: Elaboración Propia.

Para análisis de resultados de cada uno de los cálculos se requiere un proceso iterativo y la capacidad de un modelo que permita dar una gama de valores a las variables con el fin de obtener datos dentro de los rangos operativos reales de: caudal, altura neta, apertura del inyector, velocidad del agua en cada uno de los cálculos con las tablas paramétricas que nos ayude a determinar resultados que posteriormente serán graficados e interpretados y analizados para obtener resultados de optimización del proceso.

2.8. Conclusiones Capítulo II

- Se ha determinado las ecuaciones de relación y cálculo para la determinación de los parámetros de operación, mecánicos y eléctricos, utilizadas para el dimensionamiento del modelo, en base a los conceptos y principios de la teoría de mecánica de fluidos y maquinas eléctricas.
- El desarrollo del modelo se lo planteo mediante el análisis de los parámetros operación, mecánicos y eléctricos de mayor impacto siguiendo la estructura de cálculo propuesto, donde se definió las variables de las condiciones de operación que permiten calcular la potencia final obtenida y la eficiencia de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.
- Una vez que se ha obtenido la estructura de cálculo y se ha determinado las variables a considerar en el modelo, en adelante se debe aplicar el cálculo a través de una herramienta que facilite la aplicación de parametrización de estas variables y permita recomendar valores y condiciones para optimizar el proceso.

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DE LA PROPUESTA

3.1. Análisis de los resultados

El presente modelo paramétrico, describe la determinación de los parámetros operacionales, mecánicos, eléctricos relacionados a la eficiencia de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2, dichos parámetros serán estudiados y analizados para la evaluación de operación de las unidades de generación, el presente capítulo tiene como finalidad aplicar la estructura de cálculo y la determinación de las variables a través de un software de resolución de un sistema de ecuaciones, para obtener la eficiencia y recomendar condiciones para el aprovechamiento energético.

Para el desarrollo del presente modelo se ha compilado ecuaciones teóricas, con el propósito de analizar condiciones de eficiencia máxima de las unidades de generación, considerando información de datos de placa de las unidades, bitácoras, mediciones y estudios realizados a los generadores y tuberías de presión.

A continuación, se indican los parámetros operacionales del modelo, acorde a los datos de entrada principales y a las variables establecidas definidas en los puntos señalados durante el desarrollo de la presente investigación.

3.2. Estructura del Código de Programación

El código empleado para analizar el desempeño de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2 fue desarrollado en el software *Enginnering Equation Solver*. Este software

permite resolver de forma numérica complejos sistemas de ecuaciones relacionados con termodinámica, mecánica de fluidos y turbomáquinas. El código abarca a todas las ecuaciones y consideraciones indicadas en los capítulos anteriores y está dividido en 6 partes: parámetros conocidos, cálculos preliminares, cálculo de la velocidad del jet, cálculo de la potencia hidráulica, cálculo de las pérdidas eléctricas y cálculo de la potencia total.

3.2.1. Parámetros conocidos:

En este bloque del código se incluyen todos los parámetros ambientales, geométricos y de funcionamiento tanto mecánicos como eléctricos necesarios para determinar la potencia total de la central.

Estos parámetros han sido medidos en las condiciones normales de funcionamiento de la central y se muestran tabulados en la tabla 5, 6, 7 y 8.

TABLA 5.
PARÁMETROS AMBIENTALES

Parámetro	Valor	Unidad
Presión atmosférica	101325	[Pa]
Temperatura ambiente	10	[°C]
Viscosidad cinemática del fluido	0,001307	[kg/m-s]
Densidad del fluido	999,7	[kg/m ³]
Gravedad	9,8	[m/s ²]
Altura bruta	327	[m]

Fuente: Elaboración Propia.

TABLA 6.
PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y DE FUNCIONAMIENTO DE LA TUBERÍA

Parámetro	Valor	Unidad	Parámetro	Valor	Unidad	Parámetro	Valor	Unidad
Diámetro A	0,48	[m]	Longitud A	4	[m]	K Accesorio A	0	-
Diámetro B	0,48	[m]	Longitud B	4,7	[m]	K Accesorio B	0	-
Diámetro C	0,48	[m]	Longitud C	4	[m]	K Accesorio C	0,3	-
Diámetro D	0,48	[m]	Longitud D	4,7	[m]	K Accesorio D	0,3	-
Diámetro E	0,48	[m]	Longitud E	4,3	[m]	K Accesorio E	0,2	-
Diámetro F	0,48	[m]	Longitud F	4,3	[m]	K Accesorio F	0,2	-
Diámetro G	0,48	[m]	Longitud G	12	[m]	K Accesorio G	0,2	-

Diámetro H	0,68	[m]	Longitud H	1700	[m]	K Accesorio H	0,08	-
Diámetro I	0,68	[m]	Longitud I	1680	[m]	K Accesorio I	0,08	-

Fuente: Elaboración Propia.

TABLA 7.
PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y DE FUNCIONAMIENTO DE LA TURBINA

Parámetro	Valor	Unidad
Diámetro turbina	0,5	[m]
Diámetro de jet	0,095	[m]
Ángulo Betha	169	
Número de revoluciones	720	
Número Inyect.	4	U
Apertura Inyect. 1	0,8	%
Apertura Inyect. 2	0,8	%
Apertura Inyect. 3	0,8	%
Apertura Inyect. 4	0,8	%

Fuente: Elaboración Propia.

TABLA 8.
PARÁMETROS ELÉCTRICOS

Parámetro	Valor	Unidad
Diámetro Turbina	0,5	[m]
Diámetro de Jet	0,095	[m]
Número Inyect.	4	U
Apertura Inyect. 1	0,8	%

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.2. Cálculos preliminares

En este bloque del código, se indica al programa cuales son las ecuaciones necesarias para encontrar las áreas de cada tubería, así como el caudal que circula por ellas; además, en esta sección se establece la relación existente entre cada uno de los diferentes caudales con el propósito de que el programa interprete la condición de continuidad del fluido.

TABLA 9.
CÁLCULOS PRELIMINARES

CÁLCULO DE LAS ÁREAS		CÁLCULO DEL CAUDAL	
Referencia	Ecuaciones	Referencia	Ecuaciones
	$AA=PI*DA^2/4$		$QA=VA*AA$
	$AB=PI*DB^2/4$		$QB=VB*AB$
	$AC=PI*DC^2/4$		$QC=VC*AC$
	$AD=PI*DD^2/4$		$QD=VD*AD$
	$AE=PI*DE^2/4$	(2)	$QE=VE*AE$
	$AF=PI*DF^2/4$		$QF=VF*AF$
(1)	$AG=PI*DG^2/4$		$QG=VG*AG$
	$AH=PI*DH^2/4$		$QH=VH*AH$
	$AI=PI*DI^2/4$		$QI=VI*A$
	$A1=PI*D1^2/4$		$Q1=AP1*V1*A1$
	$A2=PI*D2^2/4$		$Q2=AP2*V2*A2$
	$A3=PI*D3^2/4$		$Q3=AP3*V3*A3$
	$A4=PI*D4^2/4$		$Q4=AP4*V4*A4$

CONTINUIDAD

$$QA=Q1$$

$$QB=Q2$$

$$QC=Q3$$

$$QD=Q4$$

$$QE=QA+QB$$

$$QF=QC+QD$$

$$QG=QE+QF$$

$$QG=QH+QI$$

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.3. Cálculo de la velocidad del jet

En este bloque del código se establece como primer punto las ecuaciones de Bernoulli para cada uno de los 4 inyectores tomando como puntos de referencia el nivel al que se encuentra instalado el cuarto de máquinas de la central (nivel aquí en msnm) y el nivel actual del agua en el reservorio (nivel aquí en msnm). En un segundo sub-bloque, se especifica las ecuaciones necesarias para el cálculo de las pérdidas mayores y menores. Adicionalmente, se crean dos sub-bloques, en los cuales se

incluyen las ecuaciones respectivas para determinar el número de Reynolds en cada tramo de la tubería, así como para determinar el factor de pérdidas por fricción.

TABLA 10.
CÁLCULO DE LA VELOCIDAD JET

Referencia	Ecuaciones
Ecuación de Bernoulli para cada Jet	
(4)	"INYECTOR 1" $Z01=V1^2/(2*g)+hF01+hm01$ "INYECTOR 2" $Z02=V2^2/(2*g)+hF02+hm02$ "INYECTOR 3" $Z03=V3^2/(2*g)+hF03+hm03$ "INYECTOR 4" $Z04=V4^2/(2*g)+hF04+hm04$
Pérdidas Mayores	
(6)	$hFA=FA*VA^2*LA/(2*g*DA)$ $hFB=FB*VB^2*LB/(2*g*DB)$ $hFC=FC*VC^2*LC/(2*g*DC)$ $hFD=FD*VD^2*LD/(2*g*DD)$ $hFE=FE*VE^2*LE/(2*g*DE)$ $hFF=FF*VF^2*LF/(2*g*DF)$ $hFG=FG*VG^2*LG/(2*g*DG)$ $hFH=FH*VH^2*LH/(2*g*DH)$ $hFI=FI*VI^2*LI/(2*g*DI)$ $hF01=hFA+ hFE+hFG+hFH+hFI$ $hF02=hFB+ hFE+hFG+hFH+hFI$ $hF03=hFC+ hFF+hFG+hFH+hFI$ $hF04=hFD+ hFF+hFG+hFH+hFI$ $hFH=hFI$
Pérdidas Menores	
(7)	hm01 = $KA*VA^2/(2*g)+KE*VE^2/(2*g)+KG*VG^2/(2*g)+KH*VH^2/(2*g)+KI*VI^2/(2*g)$ hm02 = $KB*VB^2/(2*g)+KE*VE^2/(2*g)+KG*VG^2/(2*g)+KH*VH^2/(2*g)+KI*VI^2/(2*g)$ hm03 = $KC*VC^2/(2*g)+KF*VF^2/(2*g)+KG*VG^2/(2*g)+KH*VH^2/(2*g)+KI*VI^2/(2*g)$ hm04 = $KD*VD^2/(2*g)+KF*VF^2/(2*g)+KG*VG^2/(2*g)+KH*VH^2/(2*g)+KI*VI^2/(2*g)$
Reynolds	
(10)	$REA=rho*VA*DA/mu$ $REB=rho*VB*DB/mu$ $REC=rho*VC*DC/mu$ $RED=rho*VD*DD/mu$

	$RE = \rho * VE * DE / \mu$ $RE = \rho * VF * DF / \mu$ $RE = \rho * VG * DG / \mu$ $RE = \rho * VH * DH / \mu$ $RE = \rho * VI * DI / \mu$
Factores de Fricción	
(11)	$1/\text{SQRT}(FA1) = 1,14 \cdot 2^* \text{LOG}_{10}((E/DA) + (9,35/(REA * \text{SQRT}(FA1))))$ $1/\text{SQRT}(FB1) = 1,14 \cdot 2^* \text{LOG}_{10}((E/DB) + (9,35/(REB * \text{SQRT}(FB1))))$ $1/\text{SQRT}(FC1) = 1,14 \cdot 2^* \text{LOG}_{10}((E/DC) + (9,35/(REC * \text{SQRT}(FC1))))$ $1/\text{SQRT}(FD1) = 1,14 \cdot 2^* \text{LOG}_{10}((E/DD) + (9,35/(RED * \text{SQRT}(FD1))))$ $1/\text{SQRT}(FE1) = 1,14 \cdot 2^* \text{LOG}_{10}((E/DE) + (9,35/(REE * \text{SQRT}(FE1))))$ $1/\text{SQRT}(FF1) = 1,14 \cdot 2^* \text{LOG}_{10}((E/DF) + (9,35/(REF * \text{SQRT}(FF1))))$ $1/\text{SQRT}(FG1) = 1,14 \cdot 2^* \text{LOG}_{10}((E/DG) + (9,35/(REG * \text{SQRT}(FG1))))$ $1/\text{SQRT}(FH1) = 1,14 \cdot 2^* \text{LOG}_{10}((E/DH) + (9,35/(REH * \text{SQRT}(FH1))))$ $1/\text{SQRT}(FI1) = 1,14 \cdot 2^* \text{LOG}_{10}((E/DI) + (9,35/(REI * \text{SQRT}(FI1))))$

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.4. Cálculo de la potencia hidráulica

Para el cálculo de la potencia hidráulica se establece en el programa la ecuación respectiva en función del número de revoluciones del generador, del ángulo de salida del agua del cangilón y de la velocidad del chorro de agua. Debido a que cada grupo generador está compuesto por dos inyectores, se crean una segunda ecuación la cual suma la potencia que generaría cada chorro de forma individual.

TABLA II.
CÁLCULO DE LA POTENCIA HIDRÁULICA

Potencia en el Eje Grupo 1	
Datos:	
PT1=P1+P2	
B=169[deg]	
RA=0,5[m]	
REVA=720 [s^-1]	
WA=REVA*(2*PI/60)	
U1=WA*RA	
U2=WA*RA	
Referencia	Ecuaciones
(12)	$P1 = \rho * Q1 * U1 * (U1 - V1) * (1 - \text{COS}(B))$ $P2 = \rho * Q2 * U2 * (U2 - V2) * (1 - \text{COS}(B))$
Potencia en el Eje Grupo 2	
Datos:	
PT2=P3+P4	

$RB=0,5[m]$ $REVB=720 [s^{-1}]$ $WB=REVB*(2*PI/60)$ $U3=WB*RB$ $U4=WB*RB$	
Referencia	Ecuaciones
(12)	$P3=\rho*Q3*U3*(U3-V3)*(1-COS(B))$ $P4=\rho*Q4*U4*(U4-V4)*(1-COS(B))$

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.5. Pérdidas eléctricas:

En el modelo se describe las ecuaciones empleadas para el cálculo de pérdidas en el hierro por corrientes Foucault, pérdidas en el hierro de Steinmetz y pérdidas en el cobre de cada uno de los elementos del generador, excitatriz y transformador capaz de llegar a conocer las pérdidas eléctricas totales de cada una de las unidades para la resolución de la potencia final de cada unidad.

En los cálculos eléctricos se presentaron varios inconvenientes principalmente la obtención de los datos de las variables en análisis, por ello nuevamente al igual que en los datos mecánicos se realizaron varios ensayos de campo para determinación y comprobación de valores de varios parámetros (ver anexo 5).

Las pérdidas en la excitatriz es una de las menos consideradas en los cálculos, en la investigación se consideró valorar y poner en cálculo para considerar todos los aspectos importantes que influyen para la eficiencia de las unidades y la central.

En los sistemas eléctricos otro de los elementos de gran consideración para pérdidas es el transformador, requiere que se calcule y se adicione a la eficiencia de la generación.

Las pérdidas dentro del ámbito mecánico y eléctrico para un generador son de gran importancia y de valor considerable que al ser expuesto al tiempo se vuelven más importantes sus valores y por ende su consideración, el cálculo se lo realizó siguiendo los siguientes datos y cálculos:

TABLA 12.
PARÁMETROS DE EQUIPOS ELÉCTRICOS CENTRAL HIDROELÉCTRICA ILLUCHI N° 2

GENERADOR	Voltaje Estator	2400	V
GENERADOR	Voltaje Rotor	80	V
GENERADOR	Corriente Estator	781,8	A
GENERADOR	Resistencia Estator	0,0117	Ω
GENERADOR	Corriente Rotor	345	A
GENERADOR	Resistencia Rotor	0,1615	Ω
GENERADOR	Potencia	3250	KVA
GENERADOR	Cos 0	0,8	
GENERADOR	Frecuencia	60	Hz
GENERADOR	Velocidad	720	RPM
GENERADOR	Eficiencia	95	%
GENERADOR	I Armadura / I Campo	2,27	A
GENERADOR	I Armadura / I Nominal	1	A
GENERADOR	Número De Polos	3	A
GENERADOR	Flujo Magnético	15	tm ²
GENERADOR	Inducción Magnética Máxima	1,1	T
GENERADOR		11000	Gauss
GENERADOR	Peso Estator	3892	kg
GENERADOR	Peso Rotor	1996	kg
GENERADOR	Coefficiente de cada Material	0,001	
GENERADOR	Espesor de la Chapa Magnética	0,5	
EXITATRIZ	Potencia	32/45	kW
EXITATRIZ	Velocidad	720	RPM
EXITATRIZ	Voltaje	100	V
EXITATRIZ	Corriente	450	A
EXITATRIZ	Masa del Rotor	78	kg
EXITATRIZ	Masa del Estator	182	kg
EXITATRIZ	Masa Total	715	kg
EXITATRIZ	Voltaje de Excitación	105/134	V
EXITATRIZ	Frecuencia	60	HZ
EXITATRIZ	Resistencia Estator	0,0015	Ω
EXITATRIZ	Resistencia Rotor	0,0012	Ω
EXITATRIZ	Constante del Material Ferromagnético	0,001	
EXITATRIZ	Espesor de la Chapa Magnética	0,35	
EXITATRIZ		1,1	T
EXITATRIZ	Inducción Magnética Máxima	11000	Gauss

EXITATRIZ	Corriente de Excitación Rotor	14,1	A
TRANSFORMADOR	Potencia	6500	kVA
TRANSFORMADOR	Relación de Transformación	5,75	
TRANSFORMADOR	Frecuencia	60	Hz
TRANSFORMADOR	Voltaje H	13800	V
TRANSFORMADOR	Voltaje L	2400	A
TRANSFORMADOR	Resistencia H	284,3	Ω
TRANSFORMADOR	Resistencia L	9	Ω
TRANSFORMADOR	Corriente en H	271,9	A
TRANSFORMADOR	Corriente en L	1563,7	A
TRANSFORMADOR	Impedancia	8,43	%
TRANSFORMADOR	Constante del Material Ferromagnético	0,001	
TRANSFORMADOR	Inducción Magnética Máxima	1	T
TRANSFORMADOR		10000	Gauss
TRANSFORMADOR	Espesor de la Chapa Magnética	0,35	mm
TRANSFORMADOR	Peso del Núcleo	806	Kg

Fuente: Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.

TABLA 13.

CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS TOTALES DE LOS GENERADORES, CENTRAL HIDROELÉCTRICA ILLUCHI N° 2

Referencia	Ecuación	Calculado	Unidad
Pérdidas en el núcleo			
(13)	$PHe = Kh * f * \beta_{max}^n * Westator$	282.6	W
	$PHr = Kh * f * \beta_{max}^n * Wrotor$	144.9	W
(14)	$PFe = \frac{(2,2 * f^2 * \beta_{max}^2 * Delta^2)}{(10^{11})} * Westator$	9324	W
	$PFr = \frac{(2,2 * f^2 * \beta_{max}^2 * Delta^2)}{(10^{11})} * Wrotor$	4782	W
(15)	$PNG = PHT + PFT$	14534	W
Pérdidas en el cobre			
(16)	PIE	21454	W
(17)	PIR	19223	W
	$PIT = PIE + PIR$	40676	W
	$P. \text{ totales Generador} = (PNG + PIT)/1000$	55.21	Kw

Fuente: Elaboración Propia.

TABLA 14.
CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS TOTALES DE LA EXCITATRIZ, CENTRAL HIDROELÉCTRICA ILLUCHI N° 2

Referencia	Ecuación	Calculado	Unidad
Pérdidas en el núcleo			
(13)	$P_{HeExt} = Kh * f * \beta_{max}^n * W_{estator}$	13.21	W
	$P_{HrExt} = Kh * f * \beta_{max}^n * W_{rotor}$	5.66	W
(14)	$P_{FeExt} = \frac{(2,2 * f^2 * \beta_{max}^2 * Delta^2)}{(10^{11})} * W_{estator}$	213.7	W
	$P_{FrExt} = \frac{(2,2 * f^2 * \beta_{max}^2 * Delta^2)}{(10^{11})} * W_{rotor}$	91.57	W
(15)	$P_{NExt} = P_{HTEExt} + P_{FTEExt}$	324.1	W
Pérdidas en el cobre			
(16)	$P_{IEExt} = 3 * I_{estator}^2$	911.3	W
(17)	P_{IREExt}	0.24	W
	$P_{ITEExt} = P_{IEExt} + P_{IREExt}$	911.5	W
	$P. \text{ totales Excitatriz} = (PNG + PIT)/1000$	1.24	kW

Fuente: Elaboración Propia.

TABLA 15.
CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS TOTALES EN EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA, CENTRAL HIDROELÉCTRICA ILLUCHI N° 2

Referencia	Ecuación	Calculado	Unidad
Pérdidas en el núcleo			
(13)	$P_{HeTrf} = Kh * f * \beta_{max}^n * W_{estator}$	48.36	W
(14)	$P_{FeTrf} = \frac{(2,2 * f^2 * \beta_{max}^2 * Delta^2)}{(10^{11})} * W_{estator}$	782	W
Pérdidas en el cobre			
(Dato)	$Perdida_Vacio$	5.52	W
(Dato)	$Perdida_Carga$	30.21	W
	$PTT = P_{HeTrf} + P_{FeTrf} + P_{Vacio} + P_{Carga}/1000$	0.86	kW

Fuente: Elaboración Propia.

Para el caso de las pérdidas en el transformador se usó datos de fábrica del transformador, pues su cálculo relaciona varias condiciones y otros datos específicos del transformador que no se dispone, por ello se utilizó la referencia del transformador como dato únicamente.

Mediante el análisis de estos datos obtenidos y calculados se puede ver que las pérdidas en el núcleo y eléctricas son mínimas, lo cual afecta en bajo porcentaje a la eficiencia de los generadores, las pérdidas de energía de cualquier máquina se convierten en calor, la elevación de la temperatura dependerá de la capacidad de disipación de calor de los distintos materiales que la componen, por ello se ha realizado el análisis de temperaturas, donde se pudo corroborar los datos históricos de al menos 3 años donde la temperatura de los bobinados de los generadores, excitatriz y transformador están en los rangos de 60 °C a 82 °C en función de la potencia nominal, siendo estos rangos los ideales de operación bajo las características técnicas de los generadores y transformadores, el rango está en los límites de temperatura según la norma IRAM 2180 según clase aislante F donde la temperatura límite es 155 °C, a continuación se indica los límites de temperatura de los distintos aislantes eléctricos que se emplean en la práctica.

TABLA 16.
LAS AISLACIONES SE CLASIFICAN SEGÚN SU GRADO DE RESISTENCIA TÉRMICA

Clase aislante	Temperatura límite °C
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
200	200
220	220
250	250

Fuente: Norma IRAM 2180/62 y 93

Clase Y: Algodón, seda, papel -sin impregnar- (muy poco uso).

Clase A: Ídem anterior, pero sumergidas o impregnadas en líquidos dieléctricos como aceite aislante o barnices.

Clase E: Esmaltes especiales para alambres de cobre en bobinados.

Clase B: Mica, fibra de vidrio, amianto, etc., con un aglomerante o impregnante adecuado.

Clase F: Ídem a Clase B que se demuestre que admiten 155 °C continuos sin deterioro de sus propiedades eléctricas y mecánicas.

Clase H: Elastómeros de silicona y combinación de materiales como pueden ser: mica, fibra de vidrio, amianto con un componente aglomerante o impregnante con barnices o resinas de siliconas.

Clase C: Mica, porcelana, vidrio, cuarzo y amianto con o sin aglomerados inorgánicos.

3.2.6. Cálculo de la potencia total y la eficiencia de la planta

Para determinar la potencia final y la eficiencia de la planta se introducen en el programa ecuaciones por cada grupo generador. De esta manera se contabilizará la potencia y la eficiencia por separado. En la primera ecuación, se resta a la potencia hidráulica las pérdidas eléctricas y se determina la potencia de salida a la red. Por otra parte, la segunda ecuación le indica al programa que debe dividir la potencia encontrada para la potencia hidráulica total.

TABLA 17.

CÁLCULO DE LA POTENCIA TOTAL Y LA EFICIENCIA DE LA PLANTA ILLUCHI N° 2

GRUPO N° 1		GRUPO N° 2	
Potencia final obtenida			
Referencia	Ecuación	Referencia	Ecuación
(19)	P_FINAL1= -PT1- PERDIDAS_ELECTOT	(19)	P_FINAL2= -PT2- PERDIDAS_ELECTOT
Eficiencia de la Turbomaquinaria			

$Q_{MAX}=1,049[m^3/s]$ $E1=P_FINAL1/(\rho*g*z01*1,049)$ $E2=P_FINAL2/(\rho*g*z02*1,049)$

Fuente: Elaboración Propia.

3.3. Funcionamiento del código de programación

Debido a que se desconoce el caudal que circula por cada uno de los ramales de la tubería, el código desarrollado tiene un funcionamiento iterativo para determinar las velocidades de salida del jet como se indica a continuación:

A partir de los parámetros conocidos, el código de programación desarrollado establece un sistema de 9 ecuaciones con 9 incógnitas. Cada una de las 9 ecuaciones es planteada a partir de la ecuación de Bernoulli para cada tramo de la tubería de presión tomando en consideración la velocidad del fluido en el ramal, las pérdidas por fricción, las pérdidas menores y un factor de fricción equivalente a la unidad. Con esta información, el software procede a resolver de forma iterativa el sistema planteado hasta que los residuales estén en el orden de 10^{-3} . Alcanzado este valor residual, el programa arroja los primeros resultados de las 9 variables desconocidas correspondientes a las velocidades de cada tramo de la tubería. En base a los valores de velocidad obtenidos se procede a determinar el número de Reynolds y el factor de fricción para cada ramal.

Como inicialmente se tomó al factor de fricción equivalente a la unidad se reemplaza dicho valor por el nuevo calculado y se repite el proceso señalado anteriormente. Este proceso iterativo se repite las veces que sean necesarias (3 veces) hasta que el nuevo valor del coeficiente de fricción sea igual al valor anterior. Una vez finalizado este proceso, con los nuevos valores de velocidad se calcula la velocidad de salida del jet tomando en consideración el área del inyector. Luego de encontrar la velocidad de salida, el programa estima la potencia hidráulica acorde a las ecuaciones indicadas en las secciones previas y se procede a encontrar la potencia de salida y la eficiencia del grupo generador.

Para determinar las pérdidas totales en los generadores, excitatriz y transformador, se procedió analizando los coeficientes de cada material y los espesores de la chapa magnética y sus características químicas, los cuales fueron utilizados para determinar las pérdidas totales tomando en consideración el peso de los equipos.

Luego se calculó mediante el software de forma iterativa las pérdidas por corrientes de Foucault, pérdidas por histéresis y en el cobre del bobinado. Luego se procedió a calcular la potencia final obtenida restando de la potencia en el eje las pérdidas totales del generador, excitatriz y transformador, este cálculo se lo realizó independientemente para el grupo N° 1 y el grupo N° 2, como se puede ver en el anexo 6.

Los resultados obtenidos son de gran utilidad para el diagnóstico y estado de operación de las máquinas eléctricas ya que los valores calculados son mínimos, lo cual permite que los equipos sigan operando bajo condiciones normales.

3.4. Resultados

Se presentan a continuación los resultados obtenidos con la aplicación de las ecuaciones anteriormente estudiadas, durante la elaboración de la metodología, así como los resultados y la validación mediante la comparación con los datos obtenidos de las dos unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.

Cabe mencionar que en las variables eléctricas no se pueden modificar sus rangos y datos medidos y compilados de los históricos de operación (ver Anexo 7), en los cuales los resultados son aceptables por que se mantienen en los rangos de operación según la norma aplicable: IEEE Std. C57.152.

Se podrán observar los rangos de variación de cada parámetro mecánico acorde a los datos de entrada y salida con la transformación de energía en el proceso de funcionamiento, según el desarrollo del presente tema de investigación.

- **Variación de la altura neta en relación a las pérdidas en bruto**

TABLA 18.
ALTURA NETA EN RELACIÓN A POTENCIA

CAÍDA (mts)	VARIACIÓN DE CAÍDA NETA	PT1 total (kW)	PT2 total (kW)	
0,00	327	2540	2542	} Optimo
-0,20	326,8	2538	2539	
-0,40	326,6	2536	2537	
-0,70	326,3	2533	2534	} No optimo
-0,90	326,1	2531	2532	
-1,10	325,9	2528	2529	
-1,30	325,7	2526	2527	
-1,60	325,4	2523	2524	
-1,80	325,2	2521	2522	
-2,00	325	2518	2519	

Fuente: Elaboración Propia.

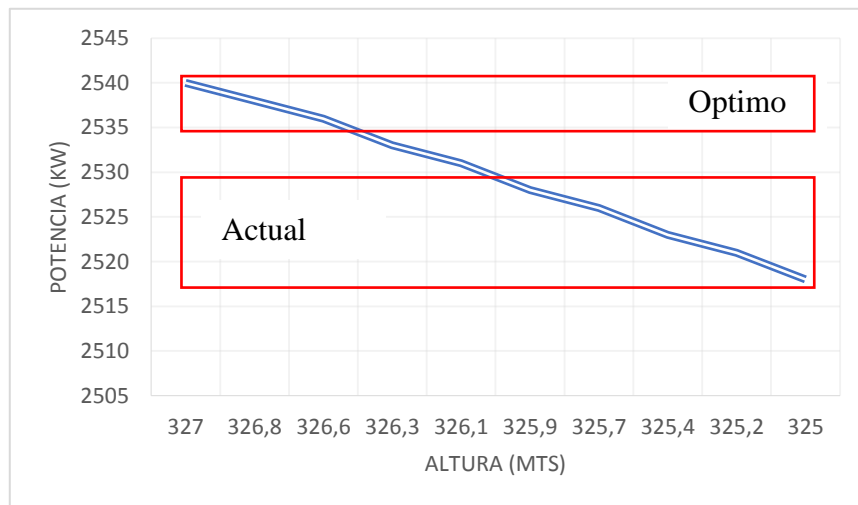


Fig. 9. Variación de la altura neta en relación a las pérdidas
(Fuente: propia)

En la figura 9 se observa la variación de la altura neta, considerando las pérdidas totales, en el modelo se observa la optimización de las alturas en relación al nivel de agua, el nivel de bocatoma, el nivel de operación tradicional y el rebote o nivel cero (0); entonces el rendimiento del agua es más eficiente en mayor altura, en el análisis se consideró una variación del parámetro altura considerando el nivel máximo aprovechable y se estableció un rango operativo factible de controlar manualmente, el

nivel recomendado de operación debería ser desde nivel cero hasta un nivel -40cm para evitar pérdidas, esto difiere de la consigna actual con la que se opera la central es decir con niveles desde -0.60 hasta -1.30mts; se realizó una relación de potencia/altura descendente para conocer las pérdidas reales, esta relación de afectación al rendimiento total es de 0.6% de la potencia total, a futuro se debe implementar un control automatizado con parametrización de nivel de agua del tanque de presión.

- **Variación de la potencia de los generadores en relación a la apertura del inyector relacionado al caudal**

TABLA 19.

POTENCIA DE LOS GENERADORES EN RELACIÓN A LA APERTURA DEL INYECTOR RELACIONADO AL CAUDAL

D1	D2	D3	D4	P_FINAL1	P_FINAL2	Q1	Q2	Q3	Q4
[m]	[m]	[m]	[m]	[W]	[W]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
0,05	0,05	0,05	0,05	797	797	0,118	0,118	0,118	0,118
0,055	0,055	0,055	0,055	935	935	0,140	0,140	0,140	0,140
0,059	0,059	0,059	0,059	1085	1085	0,164	0,164	0,164	0,164
0,064	0,064	0,064	0,064	1244	1244	0,190	0,190	0,190	0,190
0,068	0,068	0,068	0,068	1413	1413	0,218	0,218	0,218	0,218
0,073	0,073	0,073	0,073	1591	1591	0,247	0,247	0,247	0,247
0,077	0,077	0,077	0,077	1775	1776	0,278	0,278	0,278	0,278
0,082	0,082	0,082	0,082	1966	1967	0,311	0,311	0,311	0,311
0,086	0,086	0,086	0,086	2162	2163	0,345	0,345	0,345	0,345
0,091	0,091	0,091	0,091	2361	2361	0,381	0,381	0,381	0,381
0,095	0,095	0,095	0,095	2560	2562	0,418	0,418	0,418	0,418
0,1	0,1	0,1	0,1	2760	2761	0,456	0,456	0,456	0,456

Fuente: Elaboración Propia.

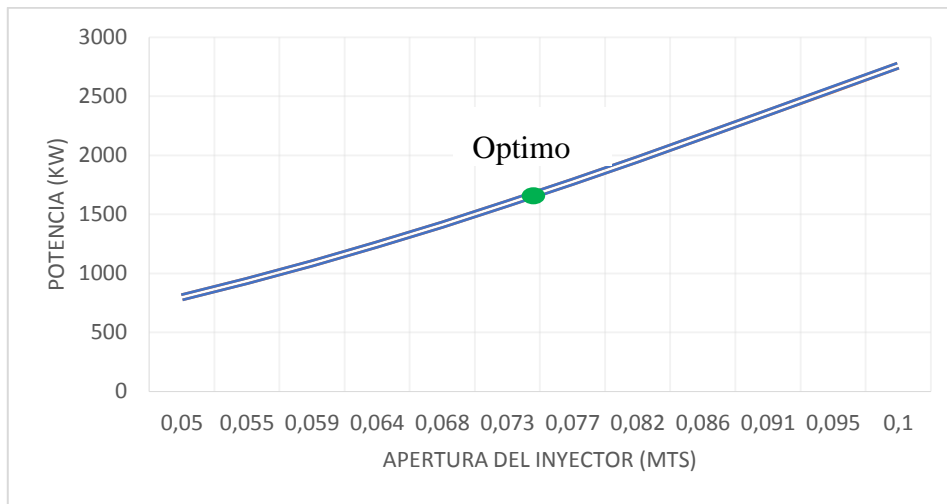


Fig. 10. Variación de la apertura del inyector en relación a la potencia eléctrica.
(Fuente: propia)

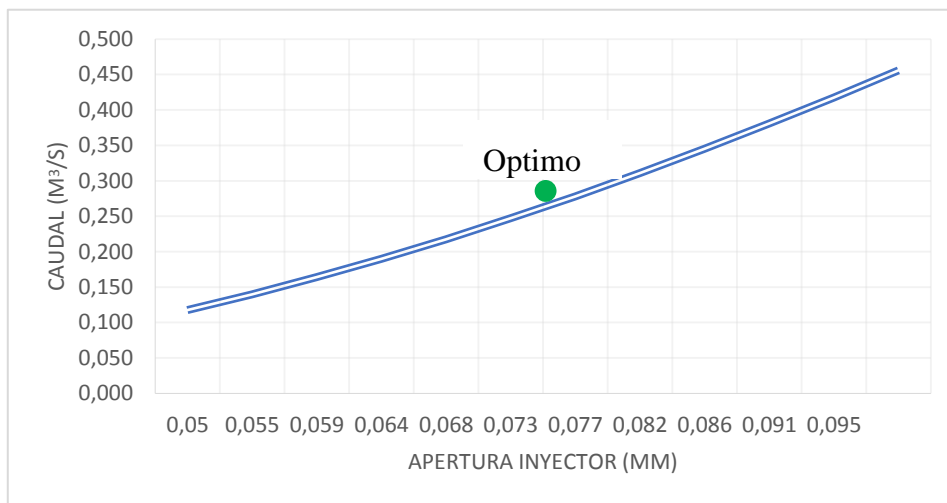


Fig. 11. Variación de la apertura del inyector en relación a la potencia eléctrica con vínculo al caudal.
(Fuente: propia)

En la figura 11 se observa la variación de la apertura de los inyectores relacionada a la potencia eléctrica y al caudal de cada una de las unidades, la relación es directamente proporcional esta condición operativa depende del diámetro de la tobera y aguja del inyector, se debería pensar más bien en aumentar los diámetros para incrementar caudal lo cual no es factible por el diseño de máquina, en este análisis lo que realmente influye es el tiempo y la apertura y cierre total del inyector puesto que

al no cumplir esta condición no se podría controlar las unidades lo que significaría realizar maniobras en las válvulas aguas arriba obligando a parar las 2 máquinas. La relación de afectación al rendimiento se debería evaluar valorando el tiempo de no producir.

- **Diferencia de potencia por altura en referencia al diseño de las turbinas**

TABLA 20.

DIFERENCIA DE POTENCIA POR ALTURA EN REFERENCIA AL DISEÑO DE LAS TURBINAS

Z01 [m]	Z02 [m]	Z03 [m]	Z04 [m]	P_FINAL1 [W]	P_FINAL2 [W]	PÉRDIDA ENTRE UNIDADES
305	305	325	325	2167	2453	11,00%
305,2	305,2	325,2	325,2	2169	2456	11,04%
305,4	305,4	325,4	325,4	2171	2458	11,04%
305,7	305,7	325,7	325,7	2174	2461	11,04%
305,9	305,9	325,9	325,9	2176	2463	11,04%
306,1	306,1	326,1	326,1	2178	2466	11,08%
306,3	306,3	326,3	326,3	2181	2468	11,04%
306,6	306,6	326,6	326,6	2183	2470	11,04%
306,8	306,8	326,8	326,8	2185	2473	11,08%
307	307	327	327	2188	2475	11,04%
PROMEDIO						11,04%

Fuente: Elaboración Propia.

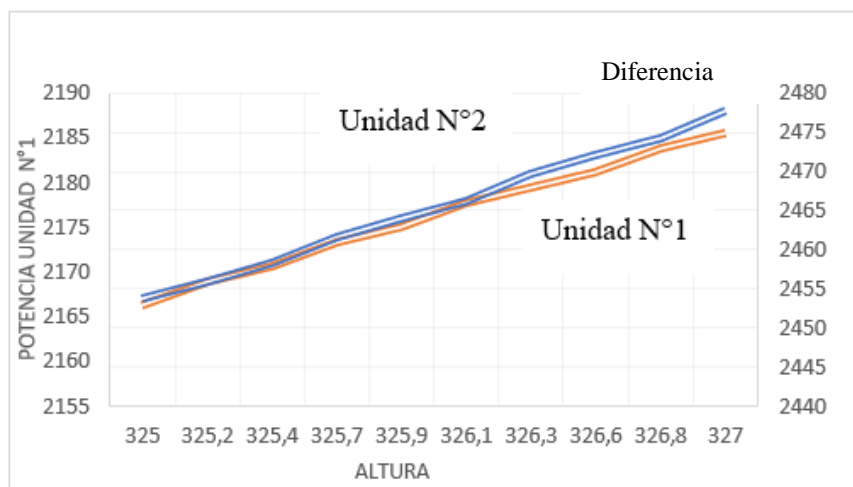


Fig. 12. Relación de la potencia entre unidades.
(Fuente: propia)

En el análisis de las potencias de las unidades, existe una diferencia de 11.04% de rendimiento, esto debido al diseño de caídas netas de cada turbina, la unidad N° 1 es para 348 metros de caída mientras que la unidad N° 2 es para 327 metros de caída neta, como se puede apreciar en la Figura 12, esto hace que la unidad N° 1 tenga un rendimiento menor. Para solucionar el inconveniente se debería cambiar la turbina, sin embargo, representaría inversiones importantes, la cual es una opción descartada por la intensidad de la investigación.

TABLA 21.

TURBINAS PELTON CENTRAL HIDROELÉCTRICA ILLUCHI N° 2

TALLERES DE CONSTRUCCIÓN BELL KRIENS – SUIZA			
ÍTEM	CARACTERÍSTICAS	G1	G2
1	Año de Construcción	1979	1979
2	N° de Fabricación	2060	2081
3	Caída	348 Mts	327 Mts
4	Caudal	0.95 m3/seg.	0.95 m3/seg.
5	Potencia	2848 kW	2675 kW
6	Velocidad	720 min.	720 min.
7	Velocidad embalam.	1320 min.	1320 min.

Fuente: Elaboración Propia.

- **Variación de la apertura del inyector relacionada la diferencia de potencia de las unidades y su velocidad**

TABLA 22.

APERTURA DEL INYECTOR RELACIONADA LA DIFERENCIA DE POTENCIA DE LAS UNIDADES Y SU VELOCIDAD

AP1	AP2	AP3	AP4	P_FINAL1	P_FINAL2	V1	V2	V3	V4
				[W]	[W]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
0,60	0,60	0,60	0,60	1895,00	2092,00	75,89	75,89	78,55	78,55
0,61	0,61	0,61	0,61	1923,00	2124,00	75,84	75,84	78,50	78,50

0,62	0,62	0,62	0,62	1952,00	2156,00	75,78	75,78	78,44	78,44
0,63	0,63	0,63	0,63	1981,00	2188,00	75,73	75,73	78,39	78,39
0,64	0,64	0,64	0,64	2009,00	2220,00	75,67	75,67	78,33	78,33
0,65	0,65	0,65	0,65	2037,00	2252,00	75,61	75,61	78,28	78,28
0,66	0,66	0,66	0,66	2065,00	2283,00	75,55	75,55	78,22	78,22
0,68	0,68	0,68	0,68	2093,00	2314,00	75,50	75,50	78,16	78,16
0,69	0,69	0,69	0,69	2120,00	2345,00	75,44	75,44	78,11	78,10
0,70	0,70	0,70	0,70	2147,00	2376,00	75,37	75,37	78,05	78,05
0,71	0,71	0,71	0,71	2175,00	2406,00	75,31	75,31	77,99	77,99
0,72	0,72	0,72	0,72	2201,00	2436,00	75,25	75,25	77,93	77,92
0,73	0,73	0,73	0,73	2228,00	2467,00	75,19	75,19	77,86	77,86
0,74	0,74	0,74	0,74	2254,00	2496,00	75,12	75,12	77,80	77,80
0,75	0,75	0,75	0,75	2280,00	2526,00	75,06	75,06	77,74	77,74

Fuente: Elaboración Propia.

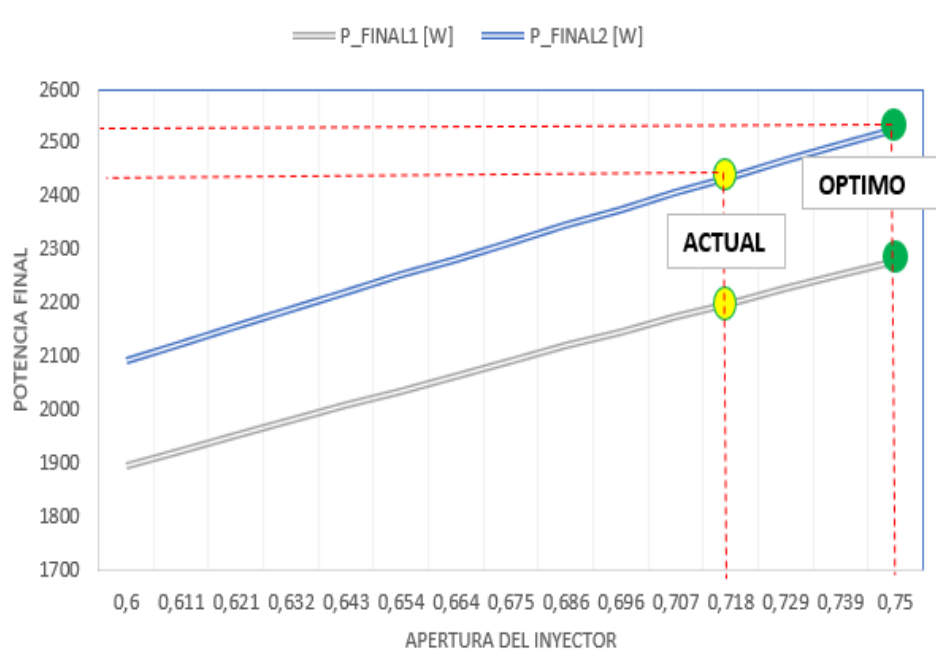


Fig. 13. Diferencia de potencia de las unidades y su velocidad.
(Fuente: propia)

De los datos presentados se observa algo muy importante que es la pérdida de la velocidad específica del agua por incremento de la apertura del inyector e incremento de la potencia, por ello la apertura del inyector óptimo según el indicador de la máquina es 0,75, que representa las mejores posiciones para aprovechamiento del recurso y menor impacto al rodete, en la ilustración del análisis se puede demostrar

que la apertura del inyector no llega a su capacidad nominal (0.75) al verificar esto en el modelo con las tablas de valores de apertura/potencia/velocidad se pudo descifrar que las aperturas se encuentran entre 0.71 la unidad N° 1 y 0.73 la unidad N° 2 lo cual se pudo demostrar en la medición de campo que al abrir manualmente con el uso del volante si pudieron llegar a su capacidad nominal, esta observación se debe a que el actuador no llega en su carrera a su posición final, sus pérdidas promedio representan un 2.3% por aperturas de los inyectores.

- **Variación del ángulo de inyección de agua relacionado a la potencia eléctrica**

TABLA 23.
ÁNGULO DE INYECCIÓN DE AGUA RELACIONADO A LA POTENCIA ELÉCTRICA

B	P_FINAL1	P_FINAL2
[deg]	[W]	[W]
165	2517	2518
166	2522	2523
167	2527	2528
168	2532	2533
169	2536	2538
170	2540	2542
171	2544	2545
172	2547	2548
173	2550	2551
174	2553	2554
175	2555	2556
176	2556	2558
177	2558	2559
178	2559	2560
179	2559	2560
180	2560	2561

Fuente: Elaboración Propia.

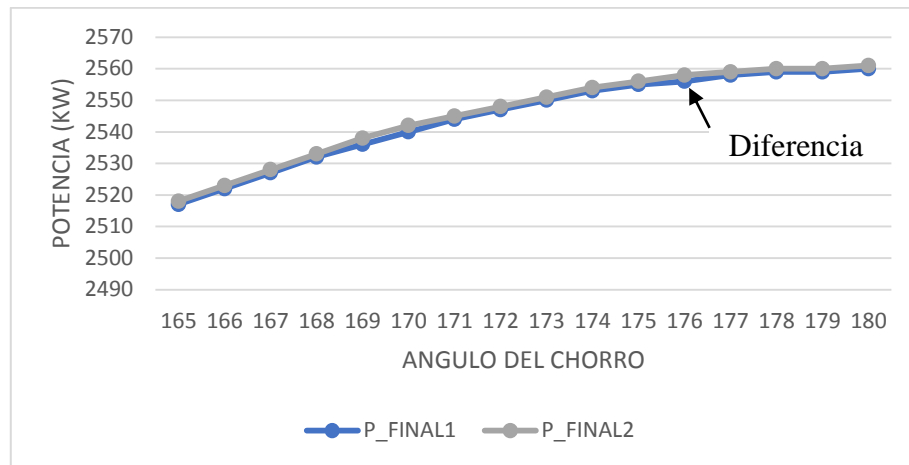


Fig. 14. Variación ángulo de inyección de agua relacionado a la potencia eléctrica.
(Fuente: propia)

Se varía el ángulo de salida al rodete para verificar la eficiencia aun cuando el inyector no permite variar debido al diseño, se ha considerado importante realizar el ensayo y ejecutar una variación para ver la importancia que significaría cambiar (esto se podría realizar en el diseño del rodete, por ejemplo) para la optimización, de ello se tiene que la relación factible es 170 hasta 173 y con esto no afectar el coeficiente de utilización, la cual es una opción descartada por la intensidad de la investigación.

- **Variación del rendimiento en la secuencia de ingreso u operación de arranque de las unidades**

TABLA 24.
RENDIMIENTO EN LA SECUENCIA DE INGRESO U OPERACIÓN DE ARRANQUE DE LAS UNIDADES

ARRANQUE 1	ARRANQUE 2	P_ARRANQUE 1 Unidad N°2	P_FARRANQUE 2 Unidad N°2	Tiempo de apertura (s)
0,20	0,02	595	595	6
0,26	0,08	784	784	12
0,32	0,14	966	966	17
0,38	0,20	1141	1141	23
0,44	0,26	1307	1307	29
0,51	0,32	1307	1425	35
0,51	0,39	1307	1567	40
0,51	0,45	1307	1729	46
0,51	0,51	1421	1861	52

0,57	0,57	1559	1997	58
0,63	0,63	1686	2124	63
0,69	0,69	1801	2242	69
0,75	0,75	1905	2361	75

Fuente: Elaboración Propia.

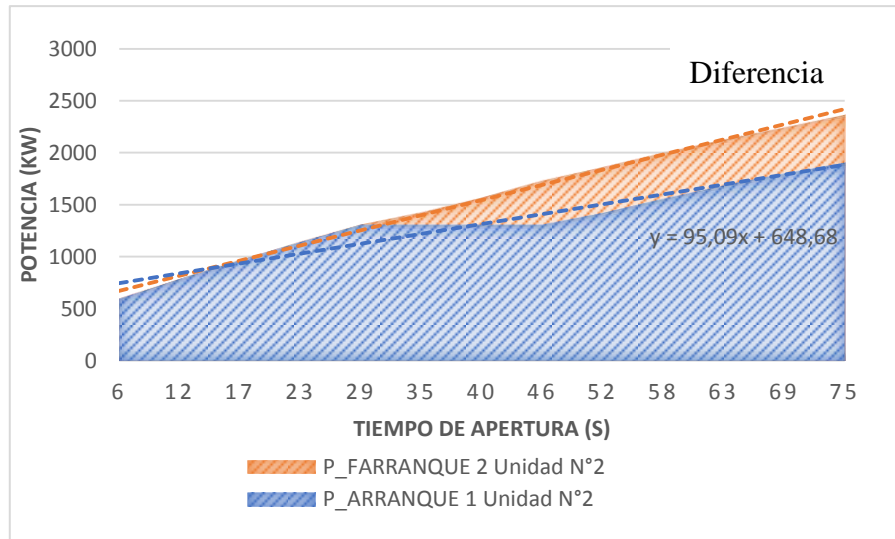


Fig. 15. Pérdida de potencia en el arranque.
(Fuente: propia)

Este fenómeno se dio al momento de medir el rendimiento de una de las máquinas, por lo que, la investigación tomó tiempo entender y relacionar con este efecto al modelo para el análisis de las pérdidas de potencia, netamente se debía a que el inyector se atranca, pierde continuidad de actuación y esto en el avance de la apertura del inyector pierde potencia generada, la falla refiere a problemas en el inyector, su afectación al rendimiento de la producción de la central representa 0.3%.

3.5. Validación

A continuación, se presentan los datos obtenidos de manera práctica con el uso de un equipo medidor de caudal por ultrasonido de tipo clamp on, no invasivo tipo fluxus f721dual con la potencia medida por un equipo analizador de calidad realizados en la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2 y el cálculo de los parámetros planteados en la metodología para la etapa de validación del modelo desarrollado.

- **Datos Obtenidos**

Se presentan los datos calculados acorde a la metodología y ecuaciones expuestos en los literales anteriores:

TABLA 25.
RENDIMIENTO DE LA UNIDAD N° 1

DATOS CALCULADOS			DEMOSTRACIÓN EXPERIMENTAL		
GRUPO 1 - 2650 KVA			GRUPO 1 - 2650 KVA		
Potencia (kW)	Caudal (m3/s)	lt/s/kW	Potencia (kW)	Caudal (m3/s)	lt/s/kW
446	0,155	0,348	446	0,166	0,37
865	0,301	0,348	865	0,305	0,35
1477	0,514	0,348	1477	0,511	0,35
1862	0,648	0,348	1862	0,663	0,36
2219	0,772	0,348	2219	0,838	0,38
	PROMEDIO	0,35			0,361
	PORCENTAJE DE VARIACIÓN	-3,56%			

Fuente: Dirección de Generación de ELEPCOSA.

TABLA 26.
RENDIMIENTO DE LA UNIDAD N° 2

DATOS CALCULADOS			DEMOSTRACIÓN EXPERIMENTAL		
GRUPO 2 - 2650 KVA			GRUPO 2 - 2650 KVA		
Potencia (kW)	Caudal (m3/s)	lt/s/kW	Potencia (kW)	Caudal (m3/s)	(lt/s/kW)
854	0,324	0,379	854	0,321	0,440
1176	0,446	0,379	1176	0,545	0,394
1598	0,606	0,379	1598	0,954	0,373
1950	0,739	0,379	1950	1,361	0,358
2468	0,935	0,379	2468	2,167	0,356
	PROMEDIO	0,38			0,38
	PORCENTAJE DE VARIACIÓN	-1,39%			

Fuente: Dirección de Generación de ELEPCOSA.

- **Discusión**

Una vez que se ha realizado la medición en campo se ha analizado la medición de caudal y potencia eléctrica, con dichas variables se pueden calcular los rendimientos

de las unidades y servirán para validar el modelo paramétrico capaz, en el que a partir de los resultados se realiza la propuesta técnica operativa para la central.

3.6. Análisis Técnico-Económico

Para realizar el análisis técnico-económico, fue fundamental los datos obtenidos del modelo paramétrico en comparación a la realidad operativa actual en la investigación.

Después del análisis de resultados se puede observar que la afectación es de tipo operativo, al plantear la investigación sin inversión económica la propuesta debe ser ejecutada con una guía denominada CONSIGNAS OPERATIVAS (anexo 8), las cuales al ser aplicadas y controladas periódicamente representarán una reducción de pérdidas; de acuerdo a lo calculado. En la revisión de campo de manera parcial en función del tiempo se ha podido constatar que en el período de enero a julio 2021 estas pérdidas han reflejado una reducción del 3,4% del primer semestre, considerando que al cierre del año con el dominio de las consignas operativas se podrá llegar a la reducción de pérdidas del 4,4% calculadas en la investigación.

Para el análisis técnico-económico los investigadores han considerado relacionar las cuatro incidencias de los resultados del análisis paramétrico con la representación de pérdidas como a continuación se indica en la siguiente tabla.

TABLA 27.
PARÁMETROS DE EVALUACIÓN

	REDUCCIÓN DE PRODUCCIÓN (%)	AFECTACIÓN ANUAL (USD)	TIPO DE AFECTACION
Variación de la altura neta en relación a la potencia.	0,6	5936.32	Operativa
Variación de la apertura del inyector relacionada con la diferencia de potencia de las unidades y su velocidad.	2,3	22755.90	Operativa
Diferencia de potencia por altura en referencia al diseño de las turbinas	0,3	2968.16	Operativa
Variación del rendimiento en la	1,2	11872.64	Operativa

secuencia de ingreso o arranque de las unidades			
Total	4,4	43 533.02	

Fuente: Elaboración Propia.

Se determinó que, en referencia a la producción del año 2020 con 26036,50 MW/h en promedio se pierde un total de producción del 4.4% debido a los factores analizados anteriormente, esto equivale a 1145.65 MW/h, que representan USD. 43.533,02 al año, al relacionar su tiempo de paralización da lugar a que por el lapso de 9 días la planta deje de generar por completo, por ello la necesidad de aplicar medidas correctivas en base al análisis realizado, estas recomendaciones se podrían evitar solo con disposiciones y consignas operativas sin invertir dinero, el objeto de estudio buscaba evaluar las oportunidades de evitar estas pérdidas en la operación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2, para mejorar la disponibilidad, eficiencia, rendimiento y con ello la rentabilidad de la central.

CONCLUSIONES

- Luego de la revisión bibliográfica y de campo, se realizó una compilación de 88 parámetros de operación eléctricos y mecánicos, de éstos una vez ponderado se utilizó los 18 parámetros de mayor impacto que caracterizan el proceso de la operación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2, con estas se desarrolló el código y cálculo de las variables hasta ajustar el modelo paramétrico.
- Una vez determinado el código se realizó tablas paramétricas en relación a las variaciones de la altura neta, caudal, apertura del inyector, potencia del eje con las que se determinaron las mejores condiciones operativas que optimizan la eficiencia de la central y establecen las CONSIGNAS OPERATIVAS.
- El proyecto consideró realizar optimización del proceso con inversión cero, es decir, sin costo de inversión, constituyen una solución a corto plazo para la optimización disminuyendo las pérdidas estimadas del 4.4%, sin embargo, los resultados también presentaron condiciones y valores que apuntalan a una solución definitiva a mediano plazo; se debe considerar el cambio de reguladores de velocidad e instrumentación de las máquinas para automatizar las unidades, ya que al analizar las propuestas técnico - económicas la inversión llegaría a USD. 980.000,00 incrementando aún más la eficiencia, ésta podría llegar a superar el 11.2% del rendimiento actual.
- En el análisis de caudales se consideró de manera importante el caudal ecológico del vigente Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos del Ecuador

donde define al caudal ecológico como el 10% del caudal promedio mensual multianual en una de sus transitorias, bajo este criterio en el caso de estudio el caudal promedio máximo del río Illuchi es de 1.68 metros cúbicos por segundo y el caudal mínimo promedio anual que operativamente se podría llegar es de es de 0.46 metros cúbicos por segundo, es decir el caudal ecológico siempre estaría protegido.

RECOMENDACIONES

En relación a los resultados del análisis paramétrico y estudio del comportamiento de sus variables corresponde a los investigadores plantear soluciones operativas para evitar pérdidas económicas en el proceso de generación, se puede mitigar muchos problemas existentes, lo importante es considerar aplicar las medidas y adoptar consignas operativas para mejorar su rendimiento y optimizar la generación, de ello se desprende las siguientes recomendaciones operativas:

- Se recomienda realizar un análisis y evaluación técnica económica, con el fin de considerar el cambio de turbina y rodete de la unidad N° 1, pues su diseño afecta el rendimiento, la turbina es para una altura de 348 metros y se opera con 327 metros de caída neta.
- El regulador de velocidad y el sistema hidráulico de cada una de las unidades presentan problemas, pues en el tiempo de trabajo que llevan estas unidades su vida útil ha terminado y para continuar trabajando de manera óptima se requiere una sustitución u overhall de estos elementos, con las condiciones actuales se puede generar afectando el rendimiento, tiempo de respuesta y precisión de movimientos, en varias veces se ha visto el atascamiento del actuador incrementando pérdidas al proceso.
- A mediano o largo plazo se debe realizar un plan de modernización y actualización de la central considerando instrumentar el proceso e integrando el

equipamiento a través de protocolos de comunicación, con el fin de automatizar las unidades (implementar lógicas de control por nivel de agua, caudal, potencia, etc.) para optimizar la generación aprovechando los recursos y producir energía bajo indicadores óptimos de rendimiento tal como muestran las unidades modernas de generación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Los Ríos del Ecuador (más importantes) - Mapa, nombres y características - Foros Ecuador 2020.” [Online]. Available: <http://www.forosecuador.ec/forum/ecuador/educación-y-ciencia/178231-los-ríos-del-ecuador-más-importantes-mapa-nombres-y-características>. [Accessed: 21-Jan-2020].
- [2] P. R. Chiriboga, “Energía Hidroeléctrica – CIE.” [Online]. Available: <http://energia.org.ec/cie/energia-hidroelectrica/>. [Accessed: 22-Jan-2020].
- [3] ARCONEL, “ATLAS DEL SECTOR ELÉCTRICO ECUATORIANO,” *Inf. GEOGRÁFICA*, 2018.
- [4] J. Garrido, Á. Zafra, and F. Vázquez, “Modelado y Simulación de Centrales Hidráulicas,” *XXVIII Jornadas de Automática*, p. 5, 2007.
- [5] F. Fernández Morales and J. Duarte, “Monitoreo de las variables eléctricas relacionadas con un generador trifásico,” *Entramado*, vol. 10, no. 2, pp. 314–321, 2014.
- [6] R. Lugo, M. Salazar, J. M. Zamora, A. Torres, and M. Toledo, “Análisis exergético de una central termoeléctrica,” *Científica*, vol. 13, no. 1, pp. 17–25, 2009.
- [7] F. Gracia Fernández, E. Álvarez Álvarez, and A. Gutiérrez Trashorras, “Análisis paramétrico mediante cfd del comportamiento hidrodinámico de un

- álabe de turbina para condiciones de baja velocidad,” no. figura 1, pp. 1–20, 2015.
- [8] M. Cardona, “Desarrollo de un Método de Diseño y Análisis por Simulación Numérica de las turbinas de Acción de Flujo Cruzado para Pico Centrales Hidroeléctricas,” 2016.
- [9] J. A. Yáñez Sánchez, “DISEÑO PARAMÉTRICO DE ÁLABES PARA TURBINAS FRANCIS,” *TESIS*, 2017.
- [10] M. Cisneros, M. A. Arjona, and F. S. Sellschopp, “Identificación paramétrica de un generador síncrono a partir de la prueba de escalón de voltaje,” *Científica*, vol. 14, no. 1, pp. 33–39, 2010.
- [11] E. Albáñez, “MODELACIÓN Y ESTIMACIÓN PARAMÉTRICA EN LÍNEA DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA DE RELUCTANCIA,” *TESIS*, vol. 151, pp. 10–17, 2015, doi: 10.1145/3132847.3132886.
- [12] C. Gebhardt, S. Preidikman, and J. Massa, “COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL ROTOR DE UN GENERADOR EÓLICO DE EJE HORIZONTAL – ESTUDIO PARAMÉTRICO,” 2008.
- [13] Argemiro Collazos Pino, Víctor Hugo Sánchez Barón and Ramiro Ortiz Flórez, *Microcentrales hidroeléctricas con aplicación de máquinas reversibles*. 2015.
- [14] J. C. Schallenberg *et al.*, *Energías renovables y eficiencia energética*. .
- [15] C. Barney L, T. Wayne C, and K. William J, *GUIDE TO ENERGY MANAGEMENT*, vol. 53, no. 9. 2019.
- [16] Fundación Endesa, “Central Hidroeléctrica” [Online]. Available: <https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-central-hidroelectrica>. [Accessed: 21-Jul-2021].
- [17] *EPRI Power Systems Dynamics Tutorial*. EPRI, Palo Alto, CA: 2009. 1016042.
- [18] M. A. Elhadidy and S. M. Shaahid, “Parametric study of hybrid (wind + solar + diesel) power generating systems,” *Renew. Energy*, vol. 21, 2000.
- [19] W. Li, J. Isberg, J. Engström, R. Waters, and M. Leijon, “Parametric Study of

- the Power Absorption for a Linear Generator Wave Energy Converter,” *J. Ocean Wind Energy*, vol. 2, no. May 2016, 2015, doi: 10.17736/jowe.2015.jcr30.
- [20] E. A. Valencia, E. G. Bone, J. A. Yáñez, E. H. Cando, S. R. Galván, and V. H. Hidalgo, “Parametric optimization to reduce erosion in a Francis turbine runner,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 240, no. 2, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/240/2/022041.
- [21] R. Hernandez Sampieri, C. Fernandez Collado, and M. del P. Baptista Lucio, *Metodología de la Investigación*, Quinta. 2010.
- [22] O. Castellero Mimenza, “Los 15 tipos de investigación (y características).” .
- [23] A. Zita, “Métodos de Investigación,” 2019. .
- [24] “Métodos, Técnicas E Instrumentos De Recoleccion De Información.” .
- [25] J. F. Chipia Lobo, “Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos,” 2012.
- [26] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, *MECÁNICA DE FLUIDOS Fundamentos y Aplicaciones*, Primera ed., México: McGraw-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2006, pp. 185-196.
- [27] B. R. Munson, D. F. Young, T. H. Okiishi y W. W. Huebsch, de *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Sexta ed., Estados Unidos de América, R. R. Donnelley / Jefferson City., 2009, p. 412.
- [28] S. J. Chapman, de *Máquinas Eléctricas*, Quinta ed., México, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2012, pp. 141-143.
- [29] M. . G. Mago-Ramos, L. Vallés, J. Olaya, M. Zequera y J. Vera-Vera, «Método para determinar las pérdidas totales en transformadores de distribución a partir del porcentaje de carbono de la chapa de acero al silicio,» *Dyna*, vol. 83, nº 198, pp. 148-153, Septiembre 2016.

ANEXOS

ANEXO 1

Diagrama de Pareto con los parámetros de estudio.

ÍTEM	PARÁMETROS	VARIABLES	PONDERACIÓN	PONDERACIÓN (%)
1	EFICIENCIA	Eficiencia del generador	5	2,02%
2	ELÉCTRICOS	Pérdidas por histéresis del generador	5	2,02%
3	ELÉCTRICOS	Pérdidas por corriente de Foucault del generador	5	2,02%
4	ELÉCTRICOS	Pérdidas totales en el núcleo del generador	5	2,02%
5	ELÉCTRICOS	Pérdidas de cobre en el estator del generador	5	2,02%
6	ELÉCTRICOS	Pérdidas de cobre en el rotor del generador	5	2,02%
7	ELÉCTRICOS	Pérdidas por histéresis de la excitatriz	5	2,02%
8	ELÉCTRICOS	Pérdidas por corriente de Foucault de la excitatriz	5	2,02%
9	ELÉCTRICOS	Pérdidas totales en el núcleo de la excitatriz	5	2,02%
10	ELÉCTRICOS	Pérdidas de cobre en el estator de la excitatriz	5	2,02%
11	ELÉCTRICOS	Pérdidas de cobre en el rotor de la excitatriz	5	2,02%
12	MECÁNICOS	Pérdidas mayores en tubería	5	2,02%
13	MECÁNICOS	Pérdidas menores en tubería	5	2,02%
14	MECÁNICOS	Pérdidas de carga total en tubería	5	2,02%

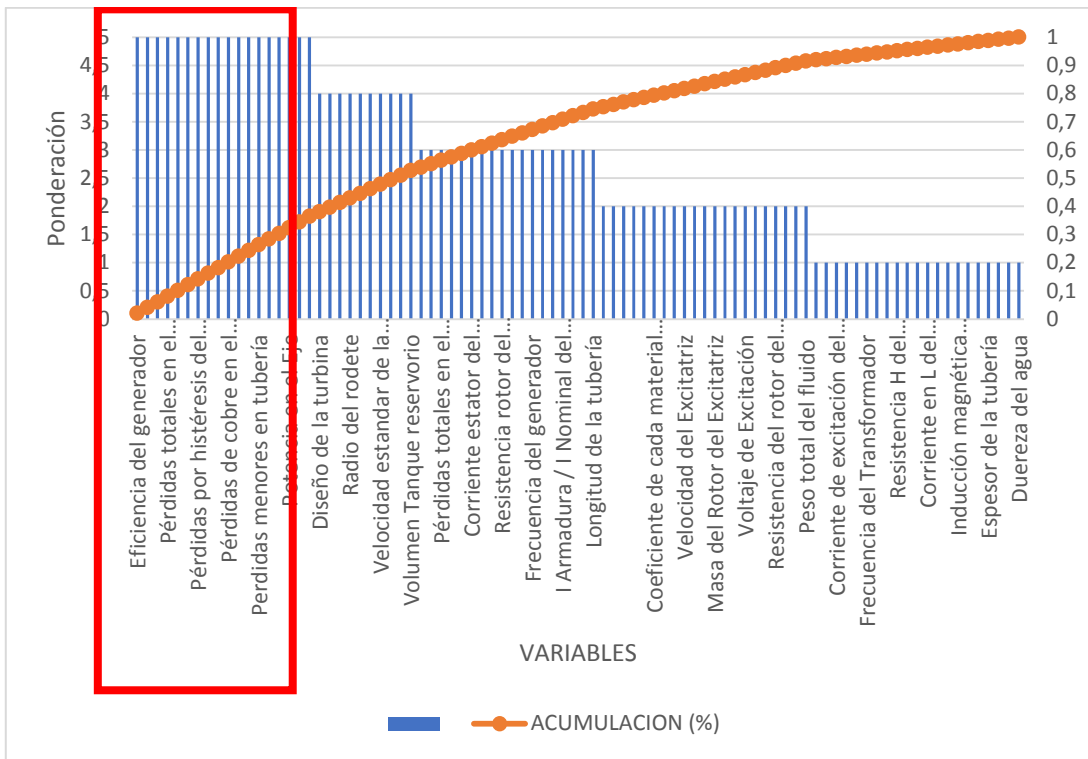
15	MECÁNICOS	Reynolds	5	2,02%
16	MECÁNICOS	Potencia en el Eje	5	2,02%
17	OPERACIÓN	Caudal	5	2,02%
18	OPERACIÓN	Altura neta	5	2,02%
19	MECÁNICOS	Diseño de la turbina	4	1,62%
20	MECÁNICOS	Factor de fricción	4	1,62%
21	OPERACIÓN	Ángulo beta de la turbina	4	1,62%
22	OPERACIÓN	Radio del rodete	4	1,62%
23	MECÁNICOS	Diámetro de la tobera	4	1,62%
24	OPERACIÓN	Área del tanque de presión	4	1,62%
25	OPERACIÓN	Velocidad estándar de la máquina	4	1,62%
26	OPERACIÓN	Altura de la central hidroeléctrica	4	1,62%
27	OPERACIÓN	Volumen tanque de presión	4	1,62%
28	OPERACIÓN	Volumen tanque reservorio	4	1,62%
29	ELÉCTRICOS	Pérdidas por histéresis del transformador	3	1,21%
30	ELÉCTRICOS	Pérdidas por corriente de Foucault del transformador	3	1,21%
31	ELÉCTRICOS	Pérdidas totales en el núcleo del transformador	3	1,21%
32	ELÉCTRICOS	Voltaje estator del generador	3	1,21%
33	ELÉCTRICOS	Voltaje rotor del generador	3	1,21%
34	ELÉCTRICOS	Corriente estator del generador	3	1,21%
35	ELÉCTRICOS	Resistencia estator del generador	3	1,21%
36	ELÉCTRICOS	Corriente rotor del generador	3	1,21%
37	ELÉCTRICOS	Resistencia rotor del generador	3	1,21%
38	ELÉCTRICOS	Potencia del generador	3	1,21%
39	ELÉCTRICOS	Cos del generador	3	1,21%
40	ELÉCTRICOS	Frecuencia del generador	3	1,21%
41	ELÉCTRICOS	Velocidad del generador	3	1,21%
42	ELÉCTRICOS	I Armadura / I campo del generador	3	1,21%
43	ELÉCTRICOS	I Armadura / I Nominal del generador	3	1,21%
44	MECÁNICOS	Diámetro del cucharón	3	1,21%
45	MECÁNICOS	Velocidad específica del chorro	3	1,21%
46	MECÁNICOS	Longitud de la tubería	3	1,21%
47	ELÉCTRICOS	Número de polos del generador	2	0,81%
48	ELÉCTRICOS	Flujo magnético del generador	2	0,81%

49	ELÉCTRICOS	Inducción magnética máxima del generador	2	0,81%
50	ELÉCTRICOS	Peso estator del generador	2	0,81%
51	ELÉCTRICOS	Peso Rotor del generador	2	0,81%
52	ELÉCTRICOS	Coefficiente de cada material del generador	2	0,81%
53	ELÉCTRICOS	Espesor de la chapa magnética del generador	2	0,81%
54	ELÉCTRICOS	Potencia de la excitatriz	2	0,81%
55	ELÉCTRICOS	Velocidad de la excitatriz	2	0,81%
56	ELÉCTRICOS	Voltaje de la excitatriz	2	0,81%
57	ELÉCTRICOS	Corriente de la excitatriz	2	0,81%
58	ELÉCTRICOS	Masa del rotor de la excitatriz	2	0,81%
59	ELÉCTRICOS	Masa del estator de la excitatriz	2	0,81%
60	ELÉCTRICOS	Masa total de la excitatriz	2	0,81%
61	ELÉCTRICOS	Voltaje de excitación	2	0,81%
62	ELÉCTRICOS	Frecuencia de la excitatriz	2	0,81%
63	ELÉCTRICOS	Resistencia del estator de la excitatriz	2	0,81%
64	ELÉCTRICOS	Resistencia del rotor de la excitatriz	2	0,81%
65	ELÉCTRICOS	Constante del material ferromagnética de la excitatriz	2	0,81%
66	MECÁNICOS	Desgaste de cangilones	2	0,81%
67	OPERACIÓN	Peso total del fluido	2	0,81%
68	ELÉCTRICOS	Espesor de la chapa magnética de la excitatriz	1	0,40%
69	ELÉCTRICOS	Inducción magnética máxima de la excitatriz	1	0,40%
70	ELÉCTRICOS	Corriente de excitación del rotor	1	0,40%
71	ELÉCTRICOS	Potencia del transformador	1	0,40%
72	ELÉCTRICOS	Relación de transformación del transformador	1	0,40%
73	ELÉCTRICOS	Frecuencia del transformador	1	0,40%
74	ELÉCTRICOS	Voltaje H del transformador	1	0,40%
75	ELÉCTRICOS	Voltaje L del transformador	1	0,40%
76	ELÉCTRICOS	Resistencia H del transformador	1	0,40%
77	ELÉCTRICOS	Resistencia L del transformador	1	0,40%
78	ELÉCTRICOS	Corriente en H del transformador	1	0,40%
79	ELÉCTRICOS	Corriente en L del transformador	1	0,40%
80	ELÉCTRICOS	Impedancia del transformador	1	0,40%

81	ELÉCTRICOS	Constante del material ferromagnético del transformador	1	0,40%
82	ELÉCTRICOS	Inducción magnética máxima del transformador	1	0,40%
83	ELÉCTRICOS	Espesor de la chapa magnética del transformador	1	0,40%
84	ELÉCTRICOS	Peso del núcleo del transformador	1	0,40%
85	MECÁNICOS	Espesor de la tubería	1	0,40%
86	OPERACIÓN	Velocidad de salida del cucharón	1	0,40%
87	OPERACIÓN	Velocidad de embalamiento de la máquina	1	0,40%
88	OPERACIÓN	Dureza del agua	1	0,40%

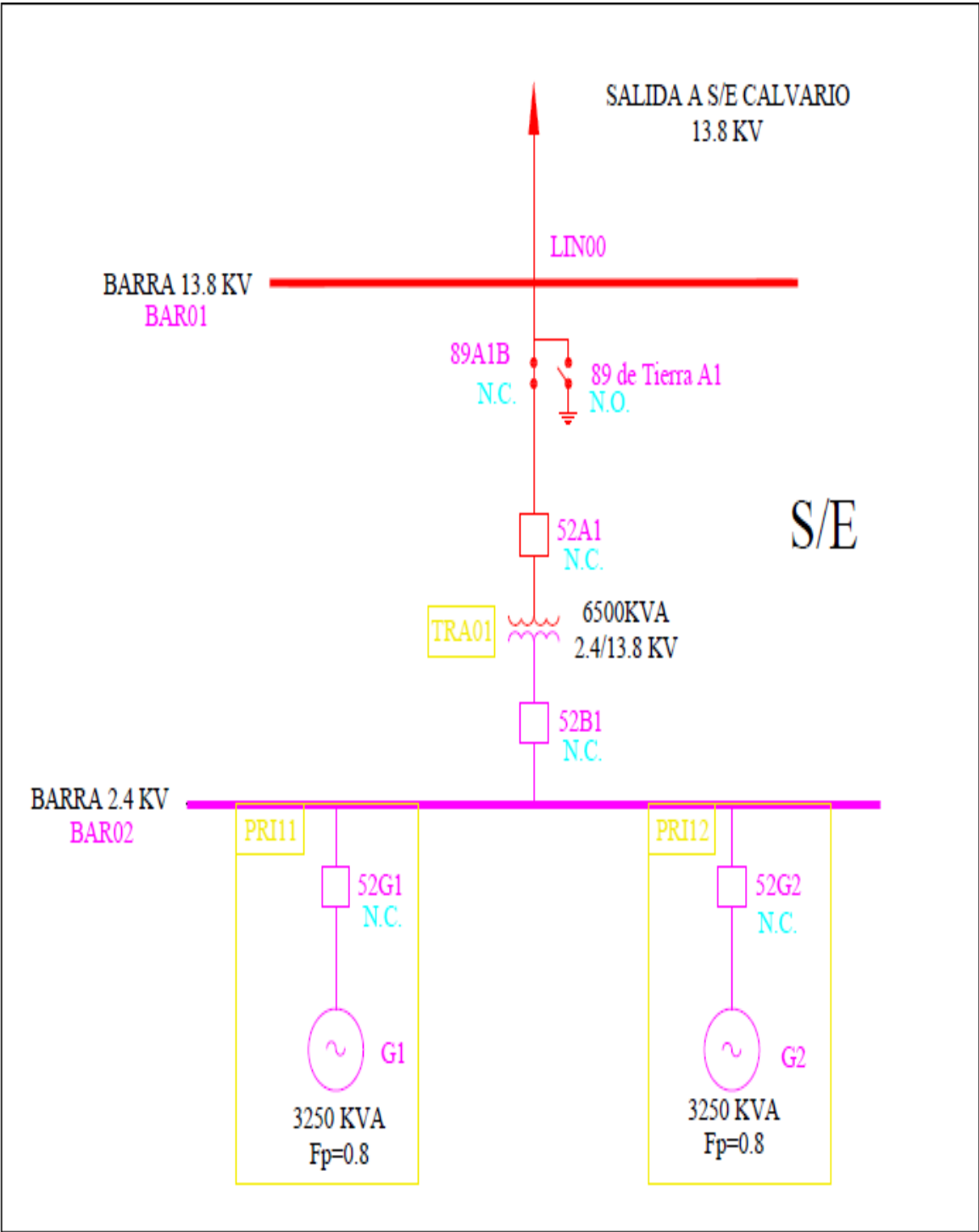
TOTAL 247

CONSIDERACIONES PARA LA PONDERACIÓN	Impacto con la eficiencia (x/3)	Impacto al Proceso (x/1)	Factor Variable (x/1)
Bajo	0	0	0
Medio	1	1	1
Alto	2	2	1



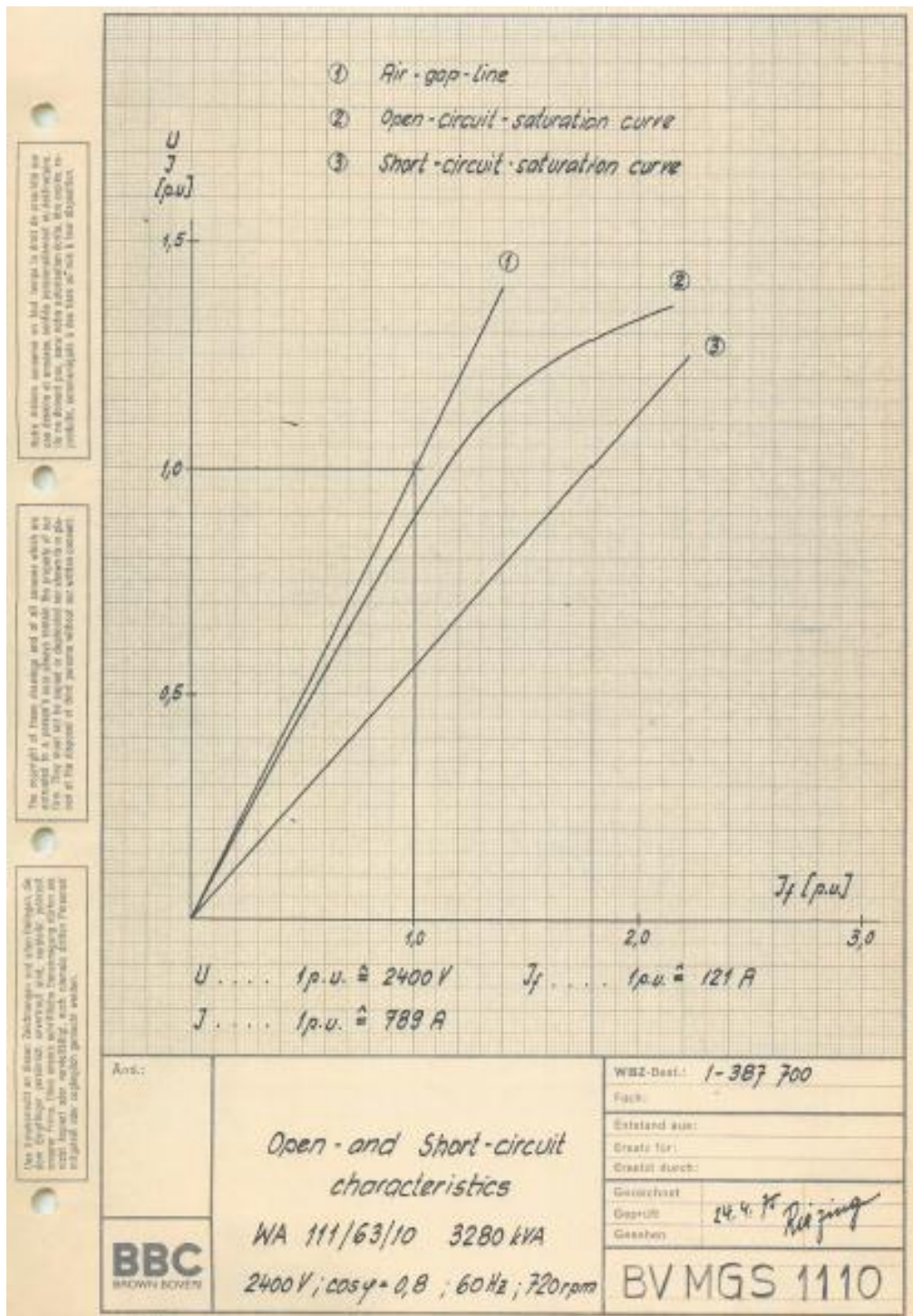
ANEXO 2

Diagrama Unifilar de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.

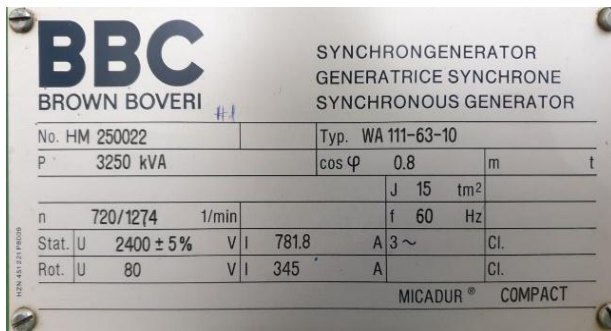


ANEXO 3

Anexo (a) Curva de capacidad generador trifásico modelo WA 111/63/10.

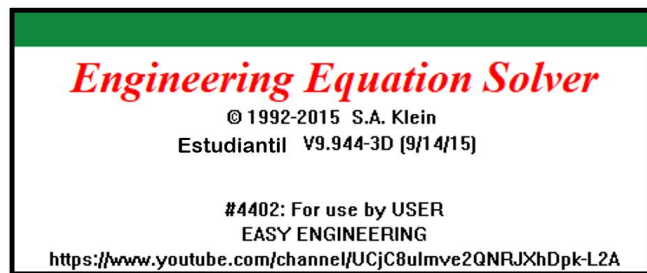


Anexo (b) Placas técnicas de tipo generadores de referencia



ANEXO 4

Licencia del Programa Engineering Equation Solver EES (Solucionador de ecuaciones de ingeniería).



ANEXO 5

Anexo (a) Datos de medición por resonancia magnética para espesores de la tubería de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.

Nº	A	B	C	D	E	F
1	5,26	5,59	5,79	6,14	5,38	5,60
2	5,20	5,42	5,62	5,46	5,38	5,15
3	5,38	5,58	5,59	7,60	5,39	5,22
4	5,88	5,98	6,07	6,07	5,37	5,27
5	5,17	5,92	5,17	5,30	5,31	5,50
6	5,65	5,20	5,87	6,08	5,94	5,21
7	5,77	5,08	6,14	5,74	5,86	5,18
8	5,56	5,64	6,00	5,67	5,14	5,63
9	6,00	5,24	6,15	5,73	5,84	5,89
10	6,17	6,03	6,20	5,87	5,28	5,42
11	5,92	5,77	5,50	6,04	5,89	5,25
12	5,78	5,53	5,32	5,26	5,87	6,09
13	6,14	5,52	5,21	5,62	5,03	5,28
14	6,51	5,87	5,85	5,86	6,87	6,12
15	5,01	5,76	5,54	5,74	6,13	6,05
16	5,68	5,40	6,47	5,88	5,10	5,86
17	5,73	5,59	6,06	6,46	6,02	5,84
18	6,46	5,69	6,35	5,98	5,12	5,11

Fuente: Dirección de Generación de ELEPCOSA.

Anexo (b) Medición de espesores de la tubería.



Fuente: Dirección de Generación de ELEPCOSA.

Anexo (c) Medición de la tubería.



Fuente: Dirección de Generación de ELEPCOSA.

ANEXO 6

Código de Programación en el software Enginnering Equation Solver para el análisis paramétrico para la evaluación de operación de las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.

"ANALISIS DE LA TUBERÍA DE PRESIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ILLUCHI N° 2"

"Las ecuaciones empleadas en el presente estudio son: BERNOULLI (Conservación de la Energía), Darcy-Weisbach (Perdidas por Fricción y pérdidas menores), Colebrook-White (Factor de pérdidas), Continuidad (Caudales) "

"METODOLOGÍA: El proceso de cálculo se centra en determinar la velocidad con la que el agua sale por los inyectores. Para ello, se lleva a cabo un cálculo iterativo tal como se detalla líneas abajo.

- a) SE ESTABLECE LA ECUACIÓN DE REYNOLDS PARA CADA PUNTO DE ANÁLISIS
- b) SE DETERMINA LAS PÉRDIDAS MAYORES Y MENORES
- c) SE DETERMINA LAS VELOCIDADES DE CADA TRAMO
- d) SE ENCUENTRA EL NÚMERO DE REYNOLDS DE CADA TRAMO
- e) SE ENCUENTRA LOS NUEVOS FACTORES DE PÉRDIDAS
- f) LOS NUEVOS FACTORES DE PÉRDIDAS REEMPLAZAN A LOS VALORES DE FA, FB, FC, FD, FE, FF, FG, FH, FI"

"PARÁMETROS CONOCIDOS"

"a) Ambientales"

P0=101,325[KPa] "Presión Atmosférica"

T0=10[C] "Temperatura ambiente"

rho=Density(Water;T=T0;P=P0) "Viscosidad"

mu=Viscosity(Water;T=T0;P=P0) "Densidad del fluido"

g=9,8[m/s^2] "Gravedad"

"b) Tubería:"

DA=0,48[m]

DB=0,48[m]

DC=0,48[m]

DD=0,48[m]

DE=0,48[m]

DF=0,48[m]

DG=0,48[m]

DH=0,68[m]

DI=0,68[m]

LA=4[m]

LB=4,7[m]

LC=4[m]

LD=4,7[m]

LE=4,3[m]

LF=4,3[m]

LG=12[m]

LH=1700[m]

LI=1680[m]

FA=0,01369

FB=0,01369

FC=0,01369

FD=0,01369

FE=0,01270

FF=0,01270

FG=0,01205

FH=0,01275
FI=0,01266
E=4,69E-5 [m]

"c) Accesorios"

KA=0
KB=0
KC=0,3
KD=0,3
KE=0,2
KF=0,2
KG=0,2
KH=0,08
KI=0,08

"d) Inyectores"

D1=0,095[m]
D2=0,095[m]
D3=0,095[m]
D4=0,095[m]
AP1=0,8 "APERTURA INYECTOR 1"
AP2=0,8 "APERTURA INYECTOR 2"
AP3=0,8 "APERTURA INYECTOR 3"
AP4=0,8 "APERTURA INYECTOR 4"

"e) Alturas"

Z01=306[m]
Z02=306[m]
Z03=327[m]
Z04=327[m]

"PARÁMETROS ELÉCTRICOS"

"<INCLUIR PARÁMETROS AQUÍ>"

"CÁLCULOS PRELIMINARES"

"a) Areas"

AA=PI*DA^2/4
AB=PI*DB^2/4
AC=PI*DC^2/4
AD=PI*DD^2/4
AE=PI*DE^2/4
AF=PI*DF^2/4
AG=PI*DG^2/4
AH=PI*DH^2/4
AI=PI*DI^2/4
A1=PI*D1^2/4
A2=PI*D2^2/4
A3=PI*D3^2/4
A4=PI*D4^2/4

"b) Caudales"

QA=VA*AA
QB=VB*AB
QC=VC*AC
QD=VD*AD
QE=VE*AE
QF=VF*AF

$$QG=VG*AG$$

$$QH=VH*AH$$

$$QI=VI*AI$$

$$Q1=AP1*V1*A1$$

$$Q2=AP2*V2*A2$$

$$Q3=AP3*V3*A3$$

$$Q4=AP4*V4*A4$$

"c) Continuidad"

$$QA=Q1$$

$$QB=Q2$$

$$QC=Q3$$

$$QD=Q4$$

$$QE=QA+QB$$

$$QF=QC+QD$$

$$QG=QE+QF$$

$$QH=QI$$

"VELOCIDAD JET"

"a) Ecuación de Bernoulli para cada Jet "

$$Z01=V1^2/(2*g)+hF01+hm01 \text{ "INYECTOR 1"}$$

$$Z02=V2^2/(2*g)+hF02+hm02 \text{ "INYECTOR 2"}$$

$$Z03=V3^2/(2*g)+hF03+hm03 \text{ "INYECTOR 3"}$$

$$Z04=V4^2/(2*g)+hF04+hm04 \text{ "INYECTOR 4"}$$

"b) PÉRDIDAS MAYORES"

$$hFA=FA*VA^2*LA/(2*g*DA)$$

$$hFB=FB*VB^2*LB/(2*g*DB)$$

$$hFC=FC*VC^2*LC/(2*g*DC)$$

$$hFD=FD*VD^2*LD/(2*g*DD)$$

$$hFE=FE*VE^2*LE/(2*g*DE)$$

$$hFF=FF*VF^2*LF/(2*g*DF)$$

$$hFG=FG*VG^2*LG/(2*g*DG)$$

$$hFH=FH*VH^2*LH/(2*g*DH)$$

$$hFI=FI*VI^2*LI/(2*g*DI)$$

$$hF01=hFA+ hFE+hFG+hFH+hFI$$

$$hF02=hFB+ hFE+hFG+hFH+hFI$$

$$hF03=hFC+ hFF+hFG+hFH+hFI$$

$$hF04=hFD+ hFF+hFG+hFH+hFI$$

$$hFH=hFI$$

"c) PÉRDIDAS MENORES"

$$hm01=KA*VA^2/(2*g)+KE*VE^2/(2*g)+KG*VG^2/(2*g)+KH*VH^2/(2*g)+KI*VI^2/(2*g)$$

$$hm02=KB*VB^2/(2*g)+KE*VE^2/(2*g)+KG*VG^2/(2*g)+KH*VH^2/(2*g)+KI*VI^2/(2*g)$$

$$hm03=KC*VC^2/(2*g)+KF*VF^2/(2*g)+KG*VG^2/(2*g)+KH*VH^2/(2*g)+KI*VI^2/(2*g)$$

$$hm04=KD*VD^2/(2*g)+KF*VF^2/(2*g)+KG*VG^2/(2*g)+KH*VH^2/(2*g)+KI*VI^2/(2*g)$$

"d) REYNOLDS"

$$REA=rho*VA*DA/mu$$

$$REB=rho*VB*DB/mu$$

$$REC=rho*VC*DC/mu$$

$$RED=rho*VD*DD/mu$$

$$REE=rho*VE*DE/mu$$

$$REF=rho*VF*DF/mu$$

$$REG=rho*VG*DG/mu$$

$$REH=rho*VH*DH/mu$$

$$REI = \rho \cdot VI \cdot DI / \mu$$

"e) FACTORES DE FRICCIÓN"

$$1/\text{SQRT}(FA1) = 1,14 \cdot 2^{-2} \cdot \text{LOG}_{10}((E/DA) + (9,35/(\text{REA} \cdot \text{SQRT}(FA1))))$$

$$1/\text{SQRT}(FB1) = 1,14 \cdot 2^{-2} \cdot \text{LOG}_{10}((E/DB) + (9,35/(\text{REB} \cdot \text{SQRT}(FB1))))$$

$$1/\text{SQRT}(FC1) = 1,14 \cdot 2^{-2} \cdot \text{LOG}_{10}((E/DC) + (9,35/(\text{REC} \cdot \text{SQRT}(FC1))))$$

$$1/\text{SQRT}(FD1) = 1,14 \cdot 2^{-2} \cdot \text{LOG}_{10}((E/DD) + (9,35/(\text{RED} \cdot \text{SQRT}(FD1))))$$

$$1/\text{SQRT}(FE1) = 1,14 \cdot 2^{-2} \cdot \text{LOG}_{10}((E/DE) + (9,35/(\text{REE} \cdot \text{SQRT}(FE1))))$$

$$1/\text{SQRT}(FF1) = 1,14 \cdot 2^{-2} \cdot \text{LOG}_{10}((E/DF) + (9,35/(\text{REF} \cdot \text{SQRT}(FF1))))$$

$$1/\text{SQRT}(FG1) = 1,14 \cdot 2^{-2} \cdot \text{LOG}_{10}((E/DG) + (9,35/(\text{REG} \cdot \text{SQRT}(FG1))))$$

$$1/\text{SQRT}(FH1) = 1,14 \cdot 2^{-2} \cdot \text{LOG}_{10}((E/DH) + (9,35/(\text{REH} \cdot \text{SQRT}(FH1))))$$

$$1/\text{SQRT}(FI1) = 1,14 \cdot 2^{-2} \cdot \text{LOG}_{10}((E/DI) + (9,35/(\text{REI} \cdot \text{SQRT}(FI1))))$$

"POTENCIA EN EL EJE GRUPO 1"

$$PT1 = P1 + P2$$

$$B = 169 [\text{deg}]$$

$$RA = 0,5 [\text{m}]$$

$$REVA = 720 [\text{s}^{-1}]$$

$$WA = REVA \cdot (2 \cdot \text{PI} / 60)$$

$$U1 = WA \cdot RA$$

$$U2 = WA \cdot RA$$

$$P1 = \rho \cdot Q1 \cdot U1 \cdot (U1 - V1) \cdot (1 - \text{COS}(B))$$

$$P2 = \rho \cdot Q2 \cdot U2 \cdot (U2 - V2) \cdot (1 - \text{COS}(B))$$

"POTENCIA EN EL EJE GRUPO 2"

$$PT2 = P3 + P4$$

$$RB = 0,5 [\text{m}]$$

$$REVB = 720 [\text{s}^{-1}]$$

$$WB = REVB \cdot (2 \cdot \text{PI} / 60)$$

$$U3 = WB \cdot RB$$

$$U4 = WB \cdot RB$$

$$P3 = \rho \cdot Q3 \cdot U3 \cdot (U3 - V3) \cdot (1 - \text{COS}(B))$$

$$P4 = \rho \cdot Q4 \cdot U4 \cdot (U4 - V4) \cdot (1 - \text{COS}(B))$$

"CÁLCULOS ELÉCTRICOS "

"Las ecuaciones empleadas en el presente estudio son: CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN EL HIERRO POR CORRIENTES FOUCAULT, PÉRDIDAS EN EL HIERRO DE STEINMETZ Y PÉRDIDAS EN EL COBRE

METODOLOGÍA: El proceso de cálculo se centra en determinar las pérdidas eléctricas en cada elemento conectado.

a) SE ESTABLECE LA ECUACIÓN CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN EL HIERRO POR CORRIENTES FOUCAULT PARA CADA ELEMENTO DE ANÁLISIS

b) SE DETERMINA PÉRDIDAS EN EL HIERRO DE STEINMETZ

c) SE DETERMINA PÉRDIDAS EN EL COBRE"

"PÉRDIDAS NÚCLEO GENERADOR"

"PÉRDIDAS POR HISTERESIS MAGNÉTICA"

$$K_{\text{material}} = 0,001$$

$$f = 60$$

$$B_{\text{max}} = 1,1$$

$$n = 2$$

$$W_{\text{estator}} = 3892$$

$$W_{\text{rotor}} = 1996$$

$$P_{\text{He}} = K_{\text{material}} \cdot f \cdot B_{\text{max}}^n \cdot W_{\text{estator}}$$

$$P_{\text{Hr}} = K_{\text{material}} \cdot f \cdot B_{\text{max}}^n \cdot W_{\text{rotor}}$$

$$P_{\text{HT}} = P_{\text{He}} + P_{\text{Hr}}$$

"PÉRDIDAS POR CORRIENTES DE FOUCAULT"


$$B_{\text{max}0} = 11000$$

$\Delta=0,5$
 $W_{0estator}=3892$
 $W_{0rotor}=1996$
 $P_{Fe}=(2,2*f^2*B_{max0}^2*\Delta^2)/(10^{11})*(W_{0estator})$
 $P_{Fr}=(2,2*f^2*B_{max0}^2*\Delta^2)/(10^{11})*(W_{0rotor})$
 $P_{FT}=P_{Fe}+P_{Fr}$
"PÉRDIDAS TOTALES DEL NÚCLEO DEL GENERADOR (PNG)"
 $P_{NG}=P_{HT}+P_{FT}$
"PÉRDIDAS ELÉCTRICAS DEL GENERADOR"
"PÉRDIDAS DEL INDUCIDO EN EL ESTATOR (PIE)"
 $I_{estator}=781,8$
 $R_{estator}=0,0175$
 $I_{rotor}=345$
 $R_{rotor}=0,0121$
 $P_{IE}=3*(I_{estator}^2)*R_{estator}$
 $P_{IR}=(I_{rotor}^2)*R_{rotor}$
 $P_{IT}=P_{IE}+P_{IR}$
"PÉRDIDAS TOTAL EN EL GENERADOR (PTG)"
 $P_{TG}=(P_{NG}+P_{IT})$
"PÉRDIDAS NÚCLEO EXITATRIZ"
"PÉRDIDAS POR HISTERESIS MAGNÉTICA"
 $W_{estatorExt}=182$
 $W_{rotorExt}=78$
 $P_{HeExt}=K_{material}*f*B_{max}^n*W_{estatorExt}$
 $P_{HrExt}=K_{material}*f*B_{max}^n*W_{rotorExt}$
 $P_{HTEExt}=P_{HeExt}+P_{HrExt}$
"PÉRDIDAS POR CORRIENTES DE FOUCAULT"
 $\Delta_{Ext}=0,35$
 $P_{FeExt}=(2,2*f^2*B_{max0}^2*\Delta_{Ext}^2)/(10^{11})*(W_{estatorExt})$
 $P_{FrExt}=(2,2*f^2*B_{max0}^2*\Delta_{Ext}^2)/(10^{11})*(W_{rotorExt})$
 $P_{FTEExt}=P_{FeExt}+P_{FrExt}$
"PÉRDIDAS TOTALES DEL NÚCLEO DEL EXITATRIZ (PNExt)"
 $P_{NEExt}=P_{HTEExt}+P_{FTEExt}$
"PÉRDIDAS DEL INDUCIDO EN EL ESTATOR EXITATRIZ (PIEExt)"
 $I_{estatorExt}=450$
 $R_{estatorExt}=0,0015$
 $I_{rotorExt}=14,1$
 $R_{rotorExt}=0,00121$
 $P_{IEExt}=3*(I_{estatorExt}^2)*R_{estatorExt}$
 $P_{IREExt}=(I_{rotorExt}^2)*R_{rotorExt}$
 $P_{ITEExt}=P_{IEExt}+P_{IREExt}$
"PÉRDIDAS TOTAL EN EL EXITATRIZ (PTEExt)"
 $P_{TEExt}=(P_{NEExt}+P_{ITEExt})$
"PÉRDIDAS EN EL TRANSFORMADOR"
"PÉRDIDAS POR HISTERESIS MAGNÉTICA TRANSFORMADOR"
 $B_{maxTrf}=1$
 $n_{Trf}=1$
 $W_{nucleo}=806$
 $P_{HeTrf}=K_{material}*f*B_{maxTrf}^n*n_{Trf}*W_{nucleo}$
"PÉRDIDAS POR CORRIENTES DE FOUCAULT"
 $B_{maxTrf1}=10000$

DeltaTrf=0,35
 WTrt=806
 $P_{FeTrf} = (2,2 * f^2 * B_{maxTrf1}^2 * DeltaTrf^2) / (10^{11}) * WTrt$
 "PÉRDIDAS DE COBRE EN EL TRANSFORMADOR (PIE)"
 PÉRDIDA_VACÍO=5,52
 PÉRDIDA_CARGA=30,21
 $PÉRDIDAS_TOTAL = PÉRDIDA_VACÍO + PÉRDIDA_CARGA$
 "PÉRDIDAS TOTAL EN EL TRANSFORMADOR (PTT)"
 $PTT = (P_{HeTrf} + P_{FeTrf} + PERDIDAS_TOTAL)$
 "PÉRDIDAS ELÉCTRICAS TOTAL"
 $PÉRDIDAS_ELECTOT = PTT + P_{TExt} + P_{TG}$
 "POTENCIA FINAL OBTENIDA"
 "Grupo 1"
 $P_FINAL1 = -PT1 - PÉRDIDAS_ELECTOT$
 "Grupo 1"
 $P_FINAL2 = -PT2 - PÉRDIDAS_ELECTOT$
 "EFICIENCIA DE LA TURBOMAQUINARIA"
 $Q_{MAX} = 1,049 [m^3/s]$
 $E1 = P_FINAL1 / (\rho * g * z01 * 1,049)$
 $E2 = P_FINAL2 / (\rho * g * z02 * 1,049)$

ANEXO 7

Anexo (a) Resistencia de devanados del generador N° 1

	GENERADOR				CÓDIGO:	FGT-GEN-RD
	RESISTENCIA DE DEVANADOS				FECHA:	18-mar-21
				COMPañIA:		
				OT#:		

DATOS DE PLACA						
SUBESTACIÓN:	ILLUCHI	ACTIVO ID:	G1	V. ROT	80 V	
POSICIÓN:	GENERADORES	AÑO:		I. ROT	781.8 A	
FABRICANTE:	BROWN BOVERI	V. STAT:	2400 V	COS	0,8	
TIPO:	WA 111-63-10	I. STAT.:	781.8 A	FRECUENCIA	60 Hz	
SERIE No.:	H M 250022	POTENCIA:		CONEXIÓN	TRIFÁSICO	

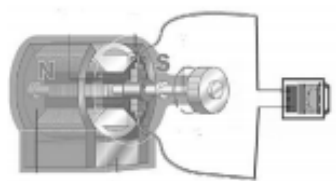
CONDICIONES DE ENSAYO					
EQUIPO DE PRUEBA:	GFLVE	TEMP. DEV. ROT (°C):	18	I. DE PRUEBA:	1 ADC
MODELO:	T-213	TEMP. DEV. STAT (°C):	18	OPERADOR:	ING. KEVIN HARO
SERIE:	1091023				

INSPECCIÓN PREVIA			
	SI	NO	OBSERVACIÓN
Daño exterior		x	
Contaminación exterior	x		
Indicativo de sobretensión		x	
Otros daños		x	

RESULTADOS DE ENSAYO						
FASE A						
ESTATOR	ROTOR	I PRUEBA (A)	VOLTAJE MEDIDO (V)	R medida (mΩ)	R corregida @ 75°C (mΩ)	EVALUACIÓN
x		1	0,0119	11,89	14,57	ACEPTABLE
FASE B						
ESTATOR	ROTOR	I PRUEBA (A)	VOLTAJE MEDIDO (V)	R medida (mΩ)	R corregida @ 75°C (mΩ)	EVALUACIÓN
x		1	0,01218	12,18	14,93	ACEPTABLE
FASE C						
ESTATOR	ROTOR	I PRUEBA (A)	VOLTAJE MEDIDO (V)	R medida (mΩ)	R corregida @ 75°C (mΩ)	EVALUACIÓN
x		1	0,01167	11,67	15,40	ACEPTABLE
ROTOR						
ESTATOR	ROTOR	I PRUEBA (A)	VOLTAJE MEDIDO (V)	R medida (mΩ)	R corregida @ 75°C (mΩ)	EVALUACIÓN
	x	1	0,1618	161,8	213,55	ACEPTABLE


CRITERIOS DE ACEPTACION	
"IEEE Std. C57.152"	%Δ = ±2%

COMENTARIOS																
Variaciones:																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Medición</th> <th>R promedio (mΩ)</th> <th>%Δ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>FASE A</td> <td style="text-align: center;">14,97</td> <td style="text-align: center;">-2,64%</td> </tr> <tr> <td>FASE B</td> <td style="text-align: center;">14,97</td> <td style="text-align: center;">-0,26%</td> </tr> <tr> <td>FASE C</td> <td style="text-align: center;">14,97</td> <td style="text-align: center;">2,90%</td> </tr> <tr> <td>ROTOR</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Medición	R promedio (mΩ)	%Δ	FASE A	14,97	-2,64%	FASE B	14,97	-0,26%	FASE C	14,97	2,90%	ROTOR			
Medición	R promedio (mΩ)	%Δ														
FASE A	14,97	-2,64%														
FASE B	14,97	-0,26%														
FASE C	14,97	2,90%														
ROTOR																
Resultados ACEPTABLES																
Norma aplicable: IEEE Std. C57.152																
NOTA: Se presenta una ligera variación en la fase C del estator al parecer propia del equipo																



REALIZADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Ing. Kevin Haro Técnico Pruebas Eléctricas ELECSATEC CÍA. LTDA.	Ing. Juan Carlos Astudillo Especialista Equipamiento Primario ELECSATEC CÍA. LTDA.	Mgs. María Fernanda Sánchez GERENTE ELECSATEC CÍA. LTDA.

Anexo (b) Resistencia de devanados del generador N° 2

	GENERADOR				CÓDIGO:	FGT-GEN-RD
	RESISTENCIA DE DEVANADOS				FECHA:	18-mar-21
				COMPañÍA:		
				OT#:		

DATOS DE PLACA						
SUBESTACIÓN:	ILLUCHI	ACTIVO ID:	G2	V. ROT	80 V	
POSICIÓN:	GENERADORES	AÑO:		I. ROT	781.8 A	
FABRICANTE:	BROWN BOVERI	V. STAT:	2400 V	COS	0,8	
TIPO:	WA 111-63-10	I. STAT.:	781.8 A	FRECUENCIA	60 Hz	
SERIE No.:	H M 250023	POTENCIA:		CONEXIÓN	TRIFÁSICO	

CONDICIONES DE ENSAYO					
EQUIPO DE PRUEBA:	GFUVE	TEMP. DEV. ROT (°C):	18	I. DE PRUEBA:	1 ADC
MODELO:	T-213	TEMP. DEV. STAT (°C):	18	OPERADOR:	ING. KEVIN HARO
SERIE:	1091023				

INSPECCIÓN PREVIA			
	SI	NO	OBSERVACIÓN
Daño exterior		X	
Contaminación exterior	X		
Indicativo de sobretensión		X	
Otros daños		X	

RESULTADOS DE ENSAYO						
FASE A						
ESTATOR	ROTOR	I PRUEBA (A)	VOLTAJE MEDIDO (V)	R medida (mΩ)	R corregida @ 75°C (mΩ)	EVALUACIÓN
X		1	0,0116	11,64	14,27	ACEPTABLE

FASE B						
ESTATOR	ROTOR	I PRUEBA (A)	VOLTAJE MEDIDO (V)	R medida (mΩ)	R corregida @ 75°C (mΩ)	EVALUACIÓN
X		1	0,01164	11,64	14,27	ACEPTABLE

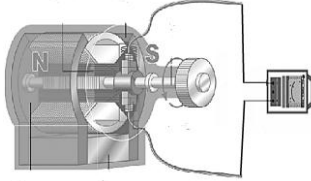
FASE C						
ESTATOR	ROTOR	I PRUEBA (A)	VOLTAJE MEDIDO (V)	R medida (mΩ)	R corregida @ 75°C (mΩ)	EVALUACIÓN
X		1	0,01166	11,66	15,39	ACEPTABLE

ROTOR						
ESTATOR	ROTOR	I PRUEBA (A)	VOLTAJE MEDIDO (V)	R medida (mΩ)	R corregida @ 75°C (mΩ)	EVALUACIÓN
	X	1	0,1615	161,5	213,15	ACEPTABLE

CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	
"IEEE Std. C57.152"	%Δ = ±2%

COMENTARIOS			
Variaciones:			
	Medición	R promedio (mΩ)	%Δ
	FASE A	14,64	-2,55%
	FASE B	14,64	-2,55%
	FASE C	14,64	5,11%
	FASE C		
Resultados ACEPTABLES			
Norma aplicable: IEEE Std. C57.152			
NOTA:			
Se presenta una ligera variación en la fase C del estator al parecer propia del equipo			

REALIZADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Ing. Kevin Haro Técnico Pruebas Eléctricas ELECSATEC CÍA. LTDA.	Ing. Juan Carlos Astudillo Especialista Equipamiento Primario ELECSATEC CÍA. LTDA.	Mgs. María Fernanda Sánchez GERENTE ELECSATEC CÍA. LTDA.



ANEXO 8

Consignas operativas de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2

Consignas operativas Central Illuchi 2

NORMAS GENERALES DE OPERACIÓN Y CONSIGNAS OPERATIVAS

1. OBJETIVOS Y ALCANCE

El presente documento tiene como finalidad normalizar los procedimientos que deben seguir los operadores de la CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE GENERACIÓN ILLUCHI N° 2 de ELEPCO S.A. tanto en condiciones normales como de emergencia, y las consignas para optimizar la operación de la generación para obtener el máximo aprovechamiento energético de los generadores en condiciones actuales.

2. NORMAS GENERALES

- Los Operadores de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2 de ELEPCO S.A., deben velar por la buena conservación de la infraestructura, los equipos y de sus partes, por lo tanto, cualquier acción que tomen durante la operación deberá estar guiada en este sentido.
- Cualquier maniobra u operación que afecte la operación normal del Sistema Nacional Interconectado o los sistemas locales, debe realizarse con el conocimiento y aprobación del COE, el Operador podrá tomar decisiones que afecten a la operación del sistema únicamente en casos de emergencia y para salvaguardar el equipo a su cargo.
- El Operador debe reportar al COE y a la Dirección de Generación, cualquier variación o fenómeno anormal que, a su criterio, puedan afectar a la correcta operación del Sistema Nacional Interconectado o la de los equipos de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.
- Los Operadores deberán seguir fielmente las instrucciones y fichas de maniobras en conjunto que se den desde el COE. Si no es posible efectuarlas, deberán informar las causas por las cuales no se puede realizar tal o cual maniobra.
- EL Operador no debe abandonar bajo ningún concepto el área de trabajo sin la aprobación específica del Director de Generación y si no es previamente reemplazado.

3. CONSIGNAS OPERATIVAS

Los relatorios de bitácoras.- En su jornada de operación el relatorio completo será llenado por el Operador, siendo éste el responsable directo de los datos llenados o que faltaren en la bitácora física o web y debe contener: fechas, hora, condiciones de entrega recepción de turnos, datos operativos relevantes, estado y novedades de las máquinas, novedades del personal, maniobras realizadas, alarmas, fallas, normalización, se registrará también las restricciones que se impongan a cualquier equipo y el responsable, los nombres de los Guardianes y Operadores de turno, además las visitas con su número de autorización, trabajos de mantenimiento con el número de la Orden de Trabajo, entre otras.

La realización de rutinas de operación. - Deben ser ejecutadas por el Operador para vigilar el estado y correcto funcionamiento de todas las instalaciones y equipos de la central de generación y

subestación. El operador tiene la obligación de revisar el comportamiento, y realizar el seguimiento y evaluación

Consignas operativas Central Illuchi 2

permanente de los parámetros de operación reflejados en la central de generación, sujetándose en modo estricto al contenido y alcance de estas rutinas, actuando con la debida atención y respetando la frecuencia establecida con datos reales en el formato de registro.

Las maniobras de operación de la central y grupos de generación. - Antes de realizar cualquier acción / maniobra en la sala de control o directamente en las unidades debe asegurarse de dominar las fichas de maniobras para arranque, parada de las unidades y la central en condiciones normales y de emergencia, donde paso a paso se asegurará la operación que requiere todos los elementos de la central.

Límites de operación por nivel de agua. - De acuerdo al análisis de eficiencia de las máquinas el nivel recomendado de operación del nivel de agua debe ser de rebote o cero (0) hasta -40cm para evitar pérdidas, recordando que al llegar del nivel a cero sin desperdiciar el agua al rebote la generación es más eficiente, por ello se debe incrementar de 1 hora a cada 20 minutos el reporte de nivel vía radio frecuencia siguiendo el protocolo de comunicación.

La apertura del inyector.- El caudal está relacionado de manera directa a la potencia generada, por ello y ante posibles errores y problemas de la máquina se supervisará constantemente la posición del indicador de apertura del inyector, la presión del sistema hidráulico y la potencia de salida del generador; no bastará con ver que el indicador llegue a 0.75 sino que a esta apertura realmente entregue la potencia prevista, por lo que, el Operador podrá abrir manualmente con el uso del volante el inyector para conseguir la capacidad nominal establecida.

Supervisión de la apertura del inyector en secuencia de arranque. - Debido a problemas del actuador del inyector detectados se debe supervisar y apoyar al sistema hidráulico – mecánico, en caso de que el sistema tienda a detenerse en su carrera o pierda continuidad de actuación se podrá ayudar con el volante o incrementando la presión de la línea hidráulica para evitar pérdidas por descuido operativo.

Operación para compensación de diferencia de diseño de turbinas. - De las condiciones de operación e infraestructura en la maquinaria se tiene una que la turbina de la unidad N° 1 el diseño presenta deficiencia por la caída neta, por ello es necesario considerar que la generación por optimización se la debe realizar priorizando el uso de la otra unidad, es decir usar la generación base la unidad N°2 a tope y luego de esto se debe usar la unidad N°1 para completar la necesidad de generación por capacidad de caudal, considerando no mantener las 2 unidades a la misma potencia o la carga dividida para estos dos generadores.

Comunicación periódica entre centrales. - Debido a que las 2 centrales se encuentran en cascada para el aprovechamiento del agua se debe considerar tener una comunicación efectiva continua, con un máximo de reporte cada media hora entre tanques de presión y centrales para conocer las condiciones operativas junto a la confirmación de las cámaras de operación y apoyo.

Es necesario considerar la ejecución prioritaria de estas consignas operativas que apoyan a mejorar el rendimiento de generación, mientras califican presupuestos para proyectos de repotenciación, mejoramiento en el equipamiento de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2.

ANEXO 9

Plan de mantenimiento de la Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2

EMPRESA ELÉCTRICA PROVINCIAL COTOPAXI S.A.														
# DE MANTENIMIENTOS PLANIFICADOS EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ILLUCHI N° 2														
DETALLE	DESCRIPCIÓN	2021												Tiempo de desconexión (horas/días)
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
LIMPIEZA E INSPECCIÓN DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN	a.- Inspección, limpieza y corrección de aceite y grasas en sistema de lubricación.													
	b.- Revisión de las bombas de los generadores.													
	c.- Mantenimiento y engrasada de los generadores.													
	d.- Revisión / cambio de las bandas de los generadores.													
	e.- Revisión / cambio de carbones de escobillas.	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
	f.- Revisión y complemento del nivel de aceite de los grupos.													
	g.- Revisión del agua de enfriamiento de los cojinetes.													
	h.- Lavado del filtro de enfriamiento de los cojinetes.													
	i.- Mantenimiento de la tubería de refrigeración del enfriamiento de los cojinetes.													

	k.-Revisión y ajuste de conexiones en bobinas.													
	l.- Inspección y desmontaje de la tapa, rodete, pernos y álabes de la turbina (Limpieza).													
	m.- Armado del generador y excitatriz.													
	n.- Armado de la turbina. (revisión mecánica y ajuste de pernos)													
	o.- Mediciones de vibraciones y ruido													
	p.- Pruebas de funcionamiento.													
MANTENIMIENTO DE TRANSFORMADORES	a.- Mantenimiento de puestas a tierra.													
	b.- Limpieza y revisión mecánica de los terminales													
	c.- Inspeccionar la posible formación de óxido en la cuba.													
	d.- Inspeccionar posibles fugas de aceite en la cuba.												1	8 HORAS
	e.- Limpieza y revisión del relé Buchholz													
	f.- Limpieza y revisión mecánica en los Bushing de alta y baja tensión													
	g.- Inspección de ruidos anormales.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	h.- Inspeccionar la temperatura.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	i.- Limpieza del cubeto.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	j.- Inspeccionar bases del transformador.	1						1						
k.- Análisis físico-químicos del aceite del transformador de potencia	1						1							
MANTENIMIENTO SUBESTACIÓN	a.- Medición de resistencia de malla a tierra	1					1							

	b.- Determinación de puntos calientes (termografía)	1						1								
	c.- Mantenimiento de Puestas a Tierra	1						1								
	d.- Desbroce de la maleza.	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			
MANTENIMIENTO DE CIRCUITOS DE CONTROL Y POTENCIA	a.- Limpieza e inspección de conductores de control y fuerza												1	8 HORAS		
	b.- Mantenimiento barras MV y AV												1		8 HORAS	
	c.- Mantenimiento de disyuntor de vacío												1			8 HORAS
	d.- Mantenimiento y limpieza de tableros de control. (Reajuste de borneras)												1			
	e.- Determinación de puntos calientes (termografía)	1						1								
	f.- Limpieza de canaletas.				1				1					1		
MANTENIMIENTO DE EQUIPOS DE PROTECCIÓN, MEDIDA Y CONTROL	a.- Inspección y limpieza del medidor de frecuencia	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			
	b.- Inspección y limpieza del medidor de voltaje generado	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			
	c.- Inspección y limpieza del sincronoscopio.	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			
	d.- Inspección y limpieza de las luces indicadores y selectores	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			
	e.- Inspección y limpieza del estado del tacómetro de la turbina.	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			
	f.- Inspección y limpieza del relé de sobrevoltaje del generador.	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			
	g.- Inspección y limpieza del relé de protección diferencial del generador	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			
	h.- Inspección del transformador de corriente.	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			

	i.- Inspección de voltajes para servicios auxiliares.													
	j.- Revisión de alarmas y actuación del relé de protección													
	k.- Inspección del transformador de potencial.	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
TANQUES DE PRESIÓN	a.- Limpieza y arreglo de las compuertas y canales del Dique	1						1						
	b.- Limpieza de los tanques de presión							1						
	c.- Revisión y limpieza del canal de agua del rebote	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
	d.- Limpieza de rejillas en la captación del agua	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
	e.- Desbroce de la maleza en el área de las tuberías de presión.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	4	
	f.- Inspeccionar posibles agrietamientos en la tubería de presión.								1					
	g.- Inspección de posibles fugas de agua en la tubería.								1					
MANTENIMIENTO DEL BANCO DE BATERÍAS	a.- Inspección y limpieza de bornes del banco de baterías	1			1			1			1			
	b.- Verificar conexiones	1			1			1			1			
	c.- Verificar nivel adecuado de agua destilada en baterías	1			1			1			1			
	d.- Verificar carga de baterías.	1			1			1			1			
MANTENIMIENTO DE INSTALACIONES GENERALES	a.- Limpieza de cuarto de máquinas.	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
	b.- Limpieza de subestación	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
	c.- Limpieza de campamentos.	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
	TOTAL	65	54	54	59	54	54	66	57	54	62	54	63	

ANEXO 10

Reporte diario de generación Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2

EMPRESA ELECTRICA PROVINCIAL COTOPAXI S.A.
 REPORTE DIARIO DE GENERACION
 CENTRAL HIDROELECTRICA ILLUCHI No. 2

FECHA: 18/04/2021 DIA: DOMINGO

HORAS	GENERADOR No.1							GENERADOR No.2							TOTAL			NIVEL AGUA (cm)	SERVICIOS AUXILIARES				
	I (A)	P (MW)	EL (MW-H)	G (MW-H)	Iex (A)	Q (MVAR)	T (°C)	I (A)	P (MW)	EL (MW-H)	G (MW-H)	Iex (A)	Q (MVAR)	T (°C)	VB (V)	Cos f	E (KW-H)		PT (KW)	QT (KVAR)	E C L (KWH)	E C (KWH)	
0:00	328	1,4	4.697,4	1,4	46	0,35	57	354	1,5	1.882,1	1,5	48	0,38	55	2.530	0,97	2.900	2.900	727	-15	51.358,5		
0:30	384	1,6			49	0,40	57	382	1,6			50	0,40	55	2.530	0,97		3.200	802				
1:00	384	1,6	4.699,0	1,6	49	0,40	57	382	1,6	1.883,7	1,6	50	0,40	55	2.530	0,97	3.200	3.200	802	0	51.362,2	3,7	
1:30	400	1,7			49	0,35	56	400	1,7			49	0,35	54	2.530	0,98		3.400	690				
2:00	400	1,7	4.700,7	1,7	49	0,35	56	400	1,7	1.885,4	1,7	49	0,35	54	2.530	0,98	3.400	3.400	690	-20	51.366,3	4,1	
2:30	402	1,7			49	0,35	56	404	1,7			49	0,35	54	2.530	0,98		3.400	690				
3:00	402	1,7	4.702,4	1,7	49	0,35	56	404	1,7	1.887,1	1,7	49	0,35	54	2.530	0,98	3.400	3.400	690	-30	51.370,5	4,2	
3:30	400	1,6			49	0,32	56	402	1,7			49	0,35	54	2.530	0,98		3.300	670				
4:00	400	1,6	4.704,0	1,6	49	0,32	56	402	1,7	1.888,8	1,7	49	0,35	54	2.530	0,98	3.300	3.300	670	-45	51.374,6	4,1	
4:30	360	1,5			47	0,38	57	346	1,5			47	0,38	55	2.530	0,97		3.000	752				
5:00	360	1,5	4.705,5	1,5	47	0,38	57	346	1,5	1.890,3	1,5	47	0,38	55	2.530	0,97	3.000	3.000	752	-45	51.378,4	3,8	
5:30	358	1,5			47	0,38	57	344	1,5			47	0,38	55	2.530	0,97		3.000	752				
6:00	358	1,5	4.707,0	1,5	47	0,38	57	344	1,5	1.891,8	1,5	47	0,38	55	2.530	0,97	3.000	3.000	752	-45	51.382,5	4,1	
6:30	360	1,5			47	0,38	57	346	1,5			47	0,38	55	2.530	0,97		3.000	752				
7:00	360	1,5	4.708,5	1,5	47	0,38	57	346	1,5	1.893,3	1,5	47	0,38	55	2.530	0,97	3.000	3.000	752		51.385,0	2,5	
7:30	346	1,5			44	0,30	57	340	1,6			44	0,32	55	2.530	0,98		3.100	629				
8:00	346	1,5	4.710,0	1,5	44	0,30	57	340	1,6	1.894,9	1,6	44	0,32	55	2.530	0,98	3.100	3.100	629	-60	51.386,6	1,6	
8:30	346	1,5			46	0,30	57	346	1,5			47	0,30	55	2.530	0,98		3.000	609				
9:00	346	1,5	4.711,5	1,5	46	0,30	57	346	1,5	1.896,4	1,5	47	0,30	55	2.530	0,98	3.000	3.000	609	-55	51.388,5	1,9	
9:30	354	1,5			47	0,38	57	346	1,5			48	0,38	55	2.530	0,97		3.000	752				
10:00	354	1,5	4.713,0	1,5	47	0,38	57	346	1,5	1.897,9	1,5	48	0,38	55	2.530	0,97	3.000	3.000	752	-60	51.390,1	1,6	
10:30	336	1,4			47	0,41	57	340	1,4			48	0,41	55	2.530	0,96		2.800	817				
11:00	336	1,4	4.714,4	1,4	47	0,41	57	340	1,4	1.899,3	1,4	48	0,41	55	2.530	0,96	2.800	2.800	817	-60	51.391,7	1,6	
11:30	306	1,2			48	0,47	58	306	1,2			49	0,47	56	2.520	0,93		2.400	949				
12:00	306	1,2	4.715,6	1,2	48	0,47	58	306	1,2	1.900,5	1,2	49	0,47	56	2.520	0,93	2.400	2.400	949	-60	51.393,2	1,5	
12:30	300	1,2			47	0,44	58	304	1,2			48	0,44	57	2.530	0,94		2.400	871				
13:00	300	1,2	4.716,8	1,2	47	0,44	58	304	1,2	1.901,7	1,2	48	0,44	57	2.530	0,94	2.400	2.400	871	-50	51.394,7	1,5	
13:30	324	1,3			48	0,43	58	318	1,3			49	0,43	57	2.530	0,95		2.600	855				
14:00	324	1,3	4.718,1	1,3	48	0,43	58	318	1,3	1.903,0	1,3	49	0,43	57	2.530	0,95	2.600	2.600	855	-35	51.396,8	2,1	
14:30	318	1,3			47	0,38	58	314	1,3			47	0,38	57	2.530	0,96		2.600	758				
15:00	318	1,3	4.719,4	1,3	47	0,38	58	314	1,3	1.904,3	1,3	47	0,38	57	2.530	0,96	2.600	2.600	758	-35	51.398,2	1,4	
15:30	318	1,3			47	0,38	58	314	1,3			47	0,38	57	2.530	0,96		2.600	758				
16:00	318	1,3	4.720,7	1,3	47	0,38	58	314	1,3	1.905,6	1,3	47	0,38	57	2.530	0,96	2.600	2.600	758	-35	51.399,6	1,4	
16:30	318	1,3			47	0,38	58	314	1,3			47	0,38	57	2.530	0,96		2.600	758				
17:00	318	1,3	4.722,0	1,3	47	0,38	58	314	1,3	1.906,9	1,3	47	0,38	57	2.530	0,96	2.600	2.600	758		51.401,2	1,6	
17:30	318	1,3			47	0,38	58	314	1,3			47	0,38	57	2.530	0,96		2.600	758				
18:00	318	1,3	4.723,3	1,3	47	0,38	58	314	1,3	1.908,2	1,3	47	0,38	57	2.530	0,96	2.600	2.600	758	-30	51.402,5	1,3	
18:30	314	1,4			47	0,41	58	312	1,4			47	0,41	57	2.540	0,96		2.800	817				
19:00	314	1,4	4.724,7	1,4	47	0,41	58	312	1,4	1.909,6	1,4	47	0,41	57	2.540	0,96	2.800	2.800	817	-30	51.406,8	4,3	
19:30	314	1,4			47	0,41	58	312	1,4			47	0,41	57	2.540	0,96		2.800	817				
20:00	314	1,4	4.726,1	1,4	47	0,41	58	312	1,4	1.911,0	1,4	47	0,41	57	2.540	0,96	2.800	2.800	817	-30	51.412,0	5,2	
20:30	314	1,4			47	0,41	58	312	1,4			47	0,41	57	2.540	0,96		2.800	817				
21:00	314	1,4	4.727,5	1,4	47	0,41	58	312	1,4	1.912,4	1,4	47	0,41	57	2.540	0,96	2.800	2.800	817	-40	51.416,4	4,4	
21:30	282	1,2			44	0,30	57	276	1,2			44	0,30	57	2.540	0,97		2.400	601				
22:00	282	1,2	4.728,7	1,2	44	0,30	57	276	1,2	1.913,6	1,2	44	0,30	57	2.540	0,97	2.400	2.400	601	-40	51.420,7	4,3	
22:30	242	1,1			43	0,28	58	256	1,1			44	0,28	57	2.540	0,97		2.200	551				
23:00	242	1,1	4.729,8	1,1	43	0,28	58	256	1,1	1.914,7	1,1	44	0,28	57	2.540	0,97	2.200	2.200	551	-35	51.425,8	5,1	
23:30	242	1,1			43	0,28	58	256	1,1			44	0,28	57	2.520	0,97		2.200	551				
24:00	242	1,1	4.730,9	1,1	43	0,28	58	256	1,1	1.915,8	1,1	44	0,28	57	2.520	0,97	2.200	2.200	551	-35	51.430,6	4,8	
MAXIMOS	402	1,7			47	0,47	58	404	1,7			50	0,47	57	2.540	0,98		3.400	949			0	
MINIMOS	242	1,1			43	0,28	56	256	1,1			44	0,28	54	2.520	0,93		2.200	551			-60	
E. TOTAL				34,9							35,2						70,100						
H.Trabajo	24							24															
No. Oper.	0							0															
Medidor serv. auxiliares 24:00			51.430,6							ENERGIA TOTAL 24:00													
																							70100

ANEXO 11

REGISTRO FOTOGRÁFICO



Ilustración 1. Central Hidroeléctrica Illuchi N° 2



Ilustración 2. Grupo de Generación N° 1

ANEXO 12

DATOS TÉCNICOS DE LAS UNIDADES DE GENERACIÓN N°1 Y N°2 DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ILLUCHI N°2

BBC BROWN BOVERI #1		SYNCHROGENERATOR GENERATRICE SYNCHRONE SYNCHRONOUS GENERATOR	
No. HM	250022	Typ.	WA 111-63-10
P	3250 kVA	cos φ	0.8
		J	15 tm ²
n	720/1274 1/min	f	60 Hz
Stat. U	2400 ± 5%	V I	781.8 A 3~
Rot. U	80	V I	345 A
MICADUR® COMPACT			

Generador N°1

BBC BROWN BOVERI #1		SYNCHROGENERATOR GENERATRICE SYNCHRONE SYNCHRONOUS GENERATOR	
No. HM	250023	Typ.	WA 111-63-10
P	3250 kVA	cos φ	0.8
		J	15 tm ²
n	720/1274 1/min	f	60 Hz
Stat. U	2400 ± 5%	V I	781.8 A 3~
Rot. U	80	V I	345 A
MICADUR® COMPACT			

Generador N°2

Anexo (a) Placas Técnicas de los Generadores de la Central Hidroeléctrica N° 2

Bell	Talleres de Construcción KRIENS - SUIZA	
Año	1979	No.de fabr.
Caída	345	m
Caudal	0.95	m ³ /s
Potencia	267	kW
Velocidad	720	min ⁻¹
Velocidad embalam.	1274	min ⁻¹

Turbina Pelton N°1

Bell	Talleres de Construcción KRIENS - SUIZA	
Año		No.de fabr.
Caída	345	m
Caudal	0.95	m ³ /s
Potencia	267	kW
Velocidad	720	min ⁻¹
Velocidad embalam.	1274	min ⁻¹

Turbina Pelton N°2

Anexo (b) Placas Técnicas de las Turbinas Pelton de la Central Hidroeléctrica N° 2.



a) Forma física

Bell	Maschinenfabrik AG. KRIENS - SCHWEIZ	
Typ	A 100	1000 Nm
Nr.	.1181	15 bar
1980		

b) Placa de datos

Anexo (c) Descripción de los reguladores de velocidad de los Grupos de generación N°1 y N°2 de la Central Hidroeléctrica N° 2.



a) Forma física

BBC		BÜRSTENLOSER ERREGER	
BROWN BOVERI		EXCITATRIZ A DIODOS ROTÓRICOS	
		BRUSHLESS EXCITER	
No.H	M 265114	1979	Typ. WFSb 5610a
P	32/45	kW	m _{rot.} 260 kg m _{tot.} 715 kg
η	720	1/min	IC 01
U	85/100	V	U _e 105/134 V IM 5410
I	376/450	A	I _e 11,0/14,1 A IP 20
Duty	CONTINU/10 S		El. IEC Cl. F

b) Placa de datos

Anexo (d) Descripción de la excitatriz de los Grupos de generación N°1 y N°2 de la Central Hidroeléctrica N° 2.



a) Forma física

KSB		Klein, Schanzlin & Becker AG	
Typ Pz Weitpl. Schieb.			
Nr. 252489		Jahr 1979	
DN 400/400	PN 40		
Betriebsdruck	bar		
Temperatur	°C		
Werkstoff	SS-025		

b) Placa de datos

Anexo (e) Descripción de la válvula principal de los Grupos de generación N°1 y N°2 de la Central Hidroeléctrica N° 2.



a) Forma física

BBC		sécheron	
BROWN BOVERI			
TRANSFORMATEUR TRIPHASE			
DREIPHASEN-TRANSFORMATOR			
THREE-PHASE TRANSFORMER			
Fa. Nr.	HST 18011-1-1	Type	TP 6500 K
Ps	6500 kVA	NORME STANDARD	IEC
HT-OS HV			
POS. 1	14500 V	258,8 A	
POS. 2	14150 V	265,2 A	
POS. 3	13800 V	271,9 A	
POS. 4	13450 V	279 A	
POS. 5	13100 V	286,5 A	
BT-OS LV	2400 V	1583,7 A	
ANWEE - JAHR - YEAR 1979			
f	60 Hz	5975 kg.	
Ecc.	8,43 %	2015 kg.	
Gr.	Y d 5	10510 kg.	
SCHEMA - DIAGRAM			HSTN 401294
SA Ateliers de Sécheron, Genève, Suisse			

b) Placa de datos

Anexo (f) Datos técnicos del transformador de potencia de la Central Hidroeléctrica N° 2.