



UNIVERSIDAD ANDINA
NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA**



**OPTIMIZACIÓN CON GAMS DEL DESPACHO DE ENERGÍA
DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL
HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II DURANTE
LOS MESES DE ESTIAJE**

TESIS PRESENTADA POR:

Bach. ROGER AMILCAR MONTES DE OCA PAREDES

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

JULIACA - PERÚ

2026



UNIVERSIDAD ANDINA
NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA
OPTIMIZACIÓN CON GAMS DEL DESPACHO DE ENERGÍA
DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL
HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II DURANTE
LOS MESES DE ESTIAJE

TESIS PRESENTADA POR:

Bach. ROGER AMILCAR MONTES DE OCA PAREDES

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

APROBADA POR EL JURADO REVISOR:

PRESIDENTE	:	 Dr. BENJAMIN CHUQUIMAMANI QUINTO
PRIMER MIEMBRO	:	 Mgtr. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS
SEGUNDO MIEMBRO	:	 Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON
ASESOR DE TESIS	:	 Ing. CARLOS ALEJANDRO CÁCERES VARGAS
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	:	INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA ELÉCTRICA P-18



TESIS UANCV

UNIVERSIDAD ANDINA

"NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"



VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓN

"OFICINA DE INVESTIGACIÓN"

RESOLUCIÓN DECANAL N° 0133-2026-D-UI-FICP-UANCV

Juliaca, 01 de abril del 2026

VISTO: El expediente N° 2026-CU-000862 presentado por el (la) Bachiller: **ROGER AMILCAR MONTES DE OCA PAREDES** estudiante de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN**.

CONSIDERANDO:

Que, el (la) Bach. **ROGER AMILCAR MONTES DE OCA PAREDES**, quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN** de la Tesis Titulada: **OPTIMIZACIÓN CON GAMS DEL DESPACHO DE ENERGÍA DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II DURANTE LOS MESES DE ESTIAJE**, la misma que pertenece a la línea de investigación **INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA ELÉCTRICA** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en concordancia con el dictamen de similitud.

De conformidad al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 24, Art. 28 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, la **NOMINACIÓN DE JURADOS** integrado por los siguientes docentes:

- * **Presidente** : Dr. BENJAMIN CHUQUIMAMANI QUINTO
- * **1er Miembro** : Mgtr. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS
- * **2do Miembro** : Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON

ARTICULO SEGUNDO.- RECONOCER como asesor de la investigación (tesis) de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras al (a la) docente, **Ing. CARLOS ALEJANDRO CACERES VARGAS**.

ARTICULO TERCERO.- APROBAR, la **FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS** de él (la) bachiller: **ROGER AMILCAR MONTES DE OCA PAREDES**; del informe final de la investigación (tesis) titulada: **OPTIMIZACIÓN CON GAMS DEL DESPACHO DE ENERGÍA DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II DURANTE LOS MESES DE ESTIAJE** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista**. de acuerdo al siguiente detalle:

- * **FECHA** : Jueves 09 de abril del 2026
- * **HORA** : 11:00 hr
- * **LUGAR** : Aula 204 - FICP

ARTÍCULO CUARTO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
Dr. Ronald Madera Terán
DECANO (e)
CIP: 66975



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
Dr. Fritz Willy Mamaní Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.
Archivo 2026
internado (e)

**NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ****RESOLUCIÓN DECANAL N° 1699-2025-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 12 de diciembre del 2025

VISTO: El expediente N° 2025-C-8559 por el señor (a): **ROGER AMILCAR MONTES DE OCA PAREDES** quien solicita **REVISIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (borrador de tesis)**, el **PROVEIDO - N° 1151-2025-UI-FICP-UANCV/J**, y la **FICHA DE OPINIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (BORRADOR DE TESIS)** formato N° 047 - 2025 del integrante del comité de investigación **EPIME** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

CONSIDERANDO:

Que, el señor (a): **ROGER AMILCAR MONTES DE OCA PAREDES**, ha presentado su informe final de la investigación (borrador de tesis) Titulada: **OPTIMIZACIÓN CON GAMS DEL DESPACHO DE ENERGÍA DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II DURANTE LOS MESES DE ESTIAJE**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación **Mgtr. Salvador Teodoro Valdivia Cardenas** de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión del informe final de la investigación (borrador de tesis) formato N° 047 - 2025 **aprobando** el informe final de la investigación (borrador de tesis) titulado: **OPTIMIZACIÓN CON GAMS DEL DESPACHO DE ENERGÍA DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II DURANTE LOS MESES DE ESTIAJE**, Correspondiente a la línea de investigación **INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA ELÉCTRICA**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducentes a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y estando a la opinión favorable del comité de investigación respecto al informe final de la investigación (borrador de tesis).

Estando, con la opinión favorable del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en mérito al Art. 27 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

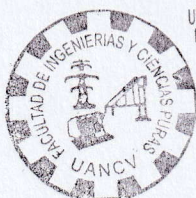
RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, el **INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (BORRADOR DE TESIS)**, para la **REVISIÓN DE SIMILITUD TURNITIN**, presentado por el señor (a): **ROGER AMILCAR MONTES DE OCA PAREDES**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista, con el Tema Titulada: **OPTIMIZACIÓN CON GAMS DEL DESPACHO DE ENERGÍA DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II DURANTE LOS MESES DE ESTIAJE** correspondiente a la línea de investigación **INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA ELÉCTRICA**, en virtud a los considerandos expuestos.

ARTÍCULO SEGUNDO.- RATIFICAR como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** al (a) la), **Ing. CARLOS ALEJANDRO CACERES VARGAS**.

ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CS. PURASDr. OSCAR V. VIAMONTE CALLA
DECANO (e)
CIP. 32730UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURASDr. César G. Camargo Najar
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓNcc.
Archivo
interesado (a)

**RESOLUCIÓN DECANAL N° 1193-2025-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 01 de octubre del 2025

VISTO: El expediente N° 2025-CU-8571, presentado por el señor (a) **ROGER AMILCAR MONTES DE OCA PAREDES** solicitando **APROBACIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** el PROVEIDO - N° 882-2025-UI-FICP-UANCV/J, y la **FICHA DE OPINIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** formato N° 046-2025 del integrante del comité de investigación **EPIME** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

CONSIDERANDO:

Que, el señor (a): **ROGER AMILCAR MONTES DE OCA PAREDES** ha presentado su propuesta de investigación Titulada: **OPTIMIZACIÓN CON GAMS DEL DESPACHO DE ENERGÍA DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II DURANTE LOS MESES DE ESTIAJE**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación **Mgtr. Salvador Teodoro Valdivia Cardenas** de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión de la propuesta de investigación formato N° 046-2025 aprobando la propuesta de investigación titulada: **OPTIMIZACIÓN CON GAMS DEL DESPACHO DE ENERGÍA DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II DURANTE LOS MESES DE ESTIAJE**.

Que, es requisito indispensable contar con un asesor docente ordinario y/o contratado de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras con un mínimo de cinco años de docencia, grado de doctor o magister y experiencia en la línea a investigar, o deberá estar acreditado por Resolución 0989-2022-UANCV-CU-R, quien asumirá como asesor de la propuesta de investigación, según el área o grado.

Estando, con la opinión favorable de la propuesta de investigación del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 25 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

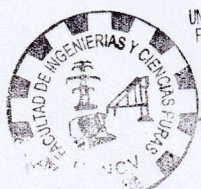
ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, la **PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN**, presentado por el señor (a): **ROGER AMILCAR MONTES DE OCA PAREDES**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista, con el Tema Titulada: **OPTIMIZACIÓN CON GAMS DEL DESPACHO DE ENERGÍA DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II DURANTE LOS MESES DE ESTIAJE** correspondiente a la línea de investigación **INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA ELÉCTRICA**.

La misma que deberá proceder con la ejecución de la propuesta de Investigación aprobado de acuerdo a lo establecido en el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales.

ARTÍCULO SEGUNDO.- RECONOCER como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** de al (a la) docente **Ing. CARLOS ALEJANDRO CACERES VARGAS**.

ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y C.S. PURASDr. OSCAR V. VILAMONTE CALLA
DECANO (e)
CIP 22720UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURASDr. Fritz Willy Mamani Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓNcc.
Archivo 2025
Interesado (a)



ROGER AMILCAR MONTES DE OCA PAREDES

OPTIMIZACIÓN CON GAMS DEL DESPACHO DE ENERGÍA DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCT...

 Trabajos de tesis para ingreso a repositorio

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::13016:593662032

Fecha de entrega

21 may 2026, 20:23 GMT-5

Fecha de descarga

21 may 2026, 20:40 GMT-5

Nombre del archivo

T036_40472001_T.docx

Tamaño del archivo

10.1 MB

128 páginas

16.725 palabras

92.083 caracteres



TESIS UANCV

19% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 17%  Fuentes de Internet
- 4%  Publicaciones
- 11%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

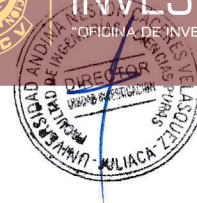
N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

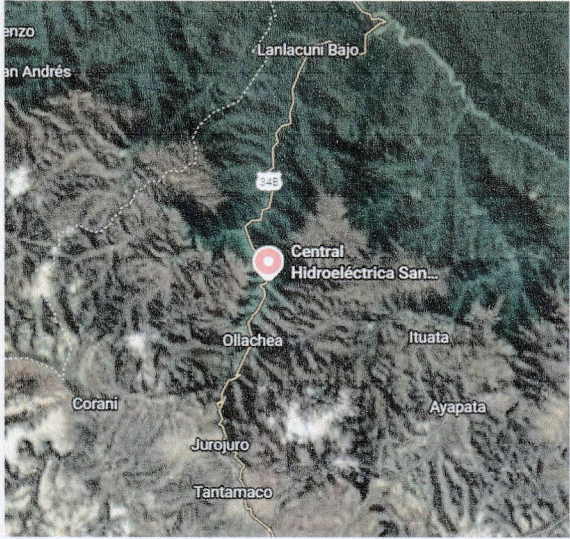


Metadatos Complementarios UANCV



Título de la tesis	
OPTIMIZACIÓN CON GAMS DEL DESPACHO DE ENERGÍA DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II DURANTE LOS MESES DE ESTIAJE	
Datos de autor	
Nombres y apellidos	ROGER AMILCAR MONTES DE OCA PAREDES
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	40472001
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-5689-7940
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	CARLOS ALEJANDRO CÁCERES VARGAS
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	29591476
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0003-9360-497X
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	BENJAMIN CHUQUIMAMANI QUINTO
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02406088
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02383061
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON



Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02064066
Datos de investigación	
Línea de investigación	Ingeniería y Tecnología Eléctrica - P18
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Recursos propios
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Puno Provincia: Carabaya Distrito: Ollachea y San Gabán - Latitud: S 13° 42' 53'' - Longitud: O 70° 27' 2''  https://maps.app.goo.gl/4e1xdXjdZCWTJoEP6
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Marzo 2025 – Enero 2026
URL de disciplinas OCDE https://concytec-pe.github.io/Peru-CRIS/vocabularios/ocde_ford.html - Librería	Ingeniería mecánica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01 Ingeniería eléctrica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.00



UNIVERSIDAD ALAMEDA VÉRTIZ
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS FÍSICAS

Dr. Fritz Willy MORAÑA Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo ROGER AMILCAR MONTES DE OCA PAREDES, identificado con
DNI Nro. 40472001 en mi condición de egresado de:

- ☒ Escuela Profesional
☐ Programa de Segunda Especialidad,
☐ Programa de Maestría o Doctorado

MECÁNICA ELÉCTRICA

informo que he elaborado el/la ☐ Tesis o ☐ Trabajo de Investigación, ☐ Trabajo Académico
denominada:

"OPTIMIZACIÓN CON GAMS DEL DESPACHO DE ENERGÍA DE LOS GRUPOS DE
GENERACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II DURANTE LOS
MESES DE ESTIAJE"

Asesorado por: ING. CARLOS ALEJANDRO CÁCERES VARGAS

Es un tema original.

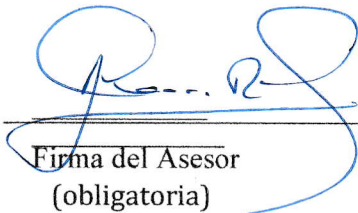
Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna
naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar)
presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de
investigación o similares, en el país o en el extranjero.

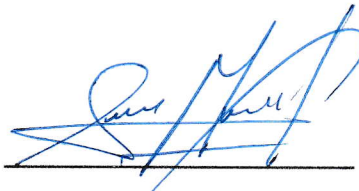
Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de
investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes
encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la
responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales
involucradas.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del
presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez y/o la
Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado
incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se
ocasionen.

Juliaca 14 de ABRIL del 2026


Firma del Asesor
(obligatoria)


Firma del Estudiante
(obligatoria)



Huella



DEDICATORIA

A la memoria de mis padres Julio y Lourdes, por toda una vida llena de amor y alegría, por sus enseñanzas y sacrificios; porque a pesar de su partida, siguen cuidando y guiando mis pasos.

A mi esposa Rocío, por su amor, comprensión y confianza.

A mis hijos Alejandro y Leonardo, por su amor incondicional y por el tiempo sacrificado, dejado de compartir con ellos, para poder alcanzar mis objetivos.



AGRADECIMIENTO

A todos los profesionales que contribuyeron y siguen contribuyendo en mi formación profesional, especialmente a la plana docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez.

A la Empresa de Generación Eléctrica San Gabán S.A. y a todos sus trabajadores, por las facilidades, consejos y sugerencias brindadas, para el desarrollo de la presente tesis.



INDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1.1. A Nivel Internacional.....	1
1.1.2. A Nivel Nacional	1
1.1.3. A Nivel Local	2
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.2.1. Justificación Teórica	3
1.2.2. Justificación Práctica	4
1.2.3. Justificación Metodológica.....	4
1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	5
1.3.1. Problema General	5
1.3.2. Problemas Específicos	5
1.4. OBJETIVOS	6
1.4.1. Objetivo General.....	6
1.4.2. Objetivos Específicos	6
1.5. HIPÓTESIS.....	7
1.5.1. Hipótesis General	7
1.5.2. Hipótesis Específicas	7



1.6. PLANTEAMIENTO DE VARIABLES	7
1.6.1. Variables Independientes	7
1.6.2. Variables Dependientes	8
1.6.3. Operacionalización de Variables	8
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	10
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	10
2.1.1. A Nivel Internacional.....	10
2.1.2. A Nivel Nacional	12
2.1.3. A Nivel Local	13
2.2. BASES TEÓRICAS.....	15
2.2.1. Central Hidroeléctrica San Gabán II	15
2.2.2. Introducción al Software GAMS.....	24
2.2.3. Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SINAC).....	31
2.2.4. Componentes del SEIN	34
2.2.5. Producción de Energía en el SEIN durante el año 2024	38
2.2.6. Análisis de la Demanda del SEIN.....	39
2.2.7. Costos Marginales Promedio del SEIN (US\$ / MWh).....	39
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	41
3.1. ÁMBITO O LUGAR DE ESTUDIO	41
3.2. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	43
3.2.1. Metodología.....	43
3.2.2. Nivel y Tipo de Investigación	43



3.2.3.	Enfoque de la Investigación	44
3.2.4.	Diseño de la Investigación.....	44
3.3.	POBLACIÓN Y MUESTRA	44
3.3.1.	Población.....	44
3.3.2.	Muestra	45
3.4.	MATERIALES Y HERRAMIENTAS.....	45
3.4.1.	Central Hidroeléctrica San Gabán II (CHSGII)	45
3.4.2.	SCADA Symphony+ (S+)	45
3.4.3.	Software GAMS.....	46
3.5.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.....	47
3.6.	PROCEDIMIENTOS	47
3.7.	INGENIERÍA DEL PROYECTO	48
3.7.1.	Planteamiento del Modelo	48
3.7.2.	Estructura del Modelo.....	48
3.8.	MODELO MATEMÁTICO DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN	51
3.8.1.	Modelado del Rendimiento de los Grupos Generadores de la CHSGII	52
3.8.2.	Definición de la Función Objetivo	55
3.8.3.	Definición de Restricciones para el Modelo Propuesto	57
3.9.	PROGRAMACIÓN EN GAMS DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN	60
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		63
4.1.	EVALUACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN.....	63
4.1.1.	Reparto Equitativo de la Consigna de Generación.....	63



4.1.2. Reparto Optimizado de la Consigna de Generación	66
4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	70
4.2.1. Incremento en la Generación de Energía.....	70
4.2.2. Incremento en los Ingresos por Venta de Energía	73
4.2.3. Aplicación del Modelo de Optimización en el Despacho de Energía	75
4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	76
CONCLUSIONES	79
RECOMENDACIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	81
ANEXOS	86



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Presa Derivadora de la CHSGII	16
Figura 2: Turbina Pelton, Inyectores y Deflectores	20
Figura 3: Actividades Desarrolladas en el SEIN.....	34
Figura 4: Producción de Energía en el SEIN en los años 2023 y 2024.....	38
Figura 5: Demanda Máxima en el SEIN Durante los años 2022, 2023 y 2024	39
Figura 6: Ubicación Geográfica de la CHSGII.....	42
Figura 7: Vista Geográfica del Embalse Regulador de la CHSGII	42
Figura 8: Diagrama de Flujo del modelo de optimización de despacho de los Grupos de la CHSGII	51
Figura 9: Gráfica de rendimiento y ecuación característica del Grupo 1 de la CHSGII.....	54
Figura 10: Gráfica de rendimiento y ecuación característica del Grupo 2 de la CHSGII.....	55
Figura 11: Despacho de Energía con Reparto Equitativo de la Consigna de Generación.....	68
Figura 12: Despacho de Energía Optimizado con GAMS	68
Figura 13: Comparación de Generación de Energía Ejecutada y Optimizada	72



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Operacionalización de Variables	9
Tabla 2: Características de los Generadores de la CHSGII	22
Tabla 3: Características de los Transformadores de Potencia de la CHSGII ..	23
Tabla 4: Costos Marginales Promedio del SEIN de los años 2023 y 2024.....	39
Tabla 5: Resumen de Potencia Activa Generada Vs Caudal Turbinado	53
Tabla 6: Datos de Generación del SCADA Symphony+	64
Tabla 7: Datos de GAMS, Modelado de Despacho Equitativo	65
Tabla 8: Datos de GAMS, Modelado de Despacho Optimizado	67
Tabla 9: Cuadro Comparativo: Despacho Ejecutado Vs Despacho Optimizado	69
Tabla 10: Despacho Optimizado con GAMS	70
Tabla 11: Despacho Ejecutado Vs Despacho Optimizado	71
Tabla 12: Ingresos Adicionales por Despacho Optimizado	73
Tabla 13: Pruebas Reales del Modelo de Optimización con GAMS	76



RESUMEN

Para realizar el presente proyecto de investigación, en primer lugar, se realizó una revisión minuciosa del estado del arte, de todos los temas que son materia de estudio, dentro de los cuales podemos destacar la generación hidroeléctrica, tutoriales de uso del software GAMS, modelos de optimización de despacho de energía, entre otros. Así mismo, se realizó un análisis del modelo de despacho de energía que actualmente se aplica en la producción de energía por parte de la central hidroeléctrica San Gabán II, ubicada entre los distritos de Ollachea y San Gabán, provincia de Carabaya, región Puno. El objetivo primordial del presente trabajo de investigación es presentar un modelo de optimización del despacho de energía de los grupos generadores de la central hidroeléctrica San Gabán II; dicho modelo ha sido hallado haciendo uso del software GAMS. Se realizaron pruebas del modelo de optimización y se determinó que, aplicando el despacho optimizado de energía, hallado con nuestro modelo en GAMS, era posible reducir el consumo del recurso hídrico, hasta en 53270.63 m³ en promedio; éste ahorro de agua, nos permite un incremento en la producción de energía de aproximadamente el 5% de la producción mensual, durante el periodo de estiaje. Así mismo, se demostró que, el beneficio económico que esa producción de energía extra representa para la Empresa de Generación Eléctrica San Gabán S.A., puede ascender a S/ 1,801,389.00.

Palabras clave:

Despacho de energía, generación hidroeléctrica, modelamiento en GAMS, optimización operacional, San Gabán II.



ABSTRACT

To carry out this research project, a thorough review of the state of the art was first conducted on all the topics under study, including hydroelectric power generation, tutorials on using the GAMS software, and energy dispatch optimization models, among others. An analysis was also performed of the energy dispatch model currently applied to power production at the San Gabán II hydroelectric plant, located between the districts of Ollachea and San Gabán, in the province of Carabaya, Puno region. The primary objective of this research is to present an energy dispatch optimization model for the generating units of the San Gabán II hydroelectric plant. This model was developed using the GAMS software. Tests of the optimization model were performed, and it was determined that by applying the optimized energy dispatch derived from our GAMS model, it was possible to reduce water consumption by up to 53270.63 m³ on average. This water saving allows us to increase energy production by approximately 5% of monthly output during the dry season. Furthermore, it was demonstrated that the economic benefit this extra energy production represents for the San Gabán Electric Generation Company can reach S/ 1,801,389.00.

Key words: GAMS modeling, hydroelectric generation, operational optimization, power dispatch, San Gabán II.



INTRODUCCIÓN

La energía es uno de los requerimientos primordiales de la humanidad, la cual desempeña un papel preponderante en el desarrollo de cualquier país (Kumar y Saini, 2022). Es posible que la energía hidroeléctrica haya sido el primer recurso de energía renovable en ser explotada por la humanidad (Breeze, 2018). El desarrollo sostenible y conservación del medio ambiente, son de preocupación a nivel mundial; debido principalmente al cambio climático y al constante incremento de la demanda de energía; es por ello que, desarrollar una energía renovable, que además sea limpia, como la hidroeléctrica, no solo puede garantizar la seguridad energética; sino también puede contribuir al desarrollo sostenible de las naciones (García-Guarín et al., 2019; Li et al., 2021).

La energía hidroeléctrica es aquella que se obtiene de aprovechar la energía potencial almacenada en el agua, que puede estar en el cauce de un río o contenida en un embalse, para convertirla en primer lugar en energía mecánica, mediante el movimiento de una turbina y, posteriormente, en energía eléctrica mediante un generador acoplado a la turbina (Fano, 2006; Orille Fernández (1997). La hidroelectricidad, es una fuente renovable de energía, que ocupa un lugar preponderante en la producción de energía eléctrica. La eficiencia energética que se obtiene al transformar la energía potencial gravitatoria en energía eléctrica, oscila alrededor del 90%; siendo en estos tiempos uno de los procesos más eficientes de producción de energía eléctrica (Fano, 2006).

Según (Breeze, 2018), la fuente de energía eléctrica más importante del mundo, proveniente de un recurso renovable es la hidroeléctrica. De igual manera, en



nuestro país, la energía hidroeléctrica ocupa un lugar preponderante, dentro de nuestra matriz energética; para hacernos una idea de ello, remitámonos a la información que el Coordinador de la Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional (COES - SINAC), pone a disposición en el Informe de la Operación Anual 2024 del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (COES - SINAC, 2025); donde se indica que, la producción total de energía eléctrica de las empresas generadoras integrantes del SEIN en el año 2024 fue de 60,028.69 GWh y, de ésta energía, el 51.33% fue generada con centrales hidroeléctricas, cuya producción asciende a 30,810.99 GWh (COES - SINAC, 2025); por ello, es de suma importancia optimizar la producción de energía hidroeléctrica.

Mi trabajo de investigación, tiene como objetivo principal optimizar el despacho de energía de los grupos de generación de la Central Hidroeléctrica San Gabán II (CHSGII), haciendo uso del software GAMS (General Algebraic Modeling System) (Chawwa, 2013). Es decir que, de acuerdo al modelado del rendimiento de los grupos, el software GAMS buscará el despacho más óptimo de energía, siendo las nuevas consignas de generación, de acuerdo al rendimiento de cada unidad; dejando de lado el antiguo criterio de dividir de manera igualitaria el despacho de energía. De esta manera, no solo se aprovechará más eficientemente el recurso hídrico disponible durante los meses de estiaje; sino que, se permitirá atender una mayor demanda de energía, incrementando la producción y los ingresos de la Empresa de Generación Eléctrica San Gabán S.A. (EGESG S.A.).

La CHSGII cuenta con dos grupos generadores interconectados al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN); cada grupo entrega una potencia



nominal de 55 MW; usando aproximadamente 19 m³/s de caudal de agua. Durante los meses de avenida (diciembre a mayo), el caudal del río es el suficiente para que la generación sea máxima de manera permanente, convirtiendo a la CHSGII en una central de pasada. La central cuenta con un embalse regulador, cuya capacidad es de 145 000 m³; el volumen almacenado permite regular la generación de energía eléctrica en épocas de estiaje (junio a noviembre); durante los meses de estiaje, se restringe la generación de la CHSGII y el despacho de energía asignado por el COES, es asumido de manera equitativa por las unidades de generación; por ejemplo, si el COES solicita generar 70 MW, cada grupo tendrá la consigna de generar 35 MW. Sin embargo, se ha determinado, por experiencia, que el rendimiento de las unidades no es igual, ni constante a lo largo de toda la escala de generación; por lo que, haciendo uso del software GAMS, pretendo modelar el funcionamiento de los grupos de la CHSGII y hallar la manera más óptima de repartir la generación asignada por el COES.

Díaz Serna (2011), nos dice que: durante los últimos años, los sistemas eléctricos de potencia (SEP) han presentado cambios significativos en sus estructuras, a nivel mundial, evolucionando de mercados monopólicos a mercados de competencia, bajo ciertas medidas regulatorias que, en el caso de Perú, están determinadas por el COES. Como consecuencia de esta nueva competitividad, las empresas generadoras se ven en la necesidad de incrementar su eficiencia, para ser cada vez más competitivas; por lo que, requieren nuevos enfoques y mejores herramientas de optimización para la



programación de su operación, con el objeto de incrementar la eficiencia técnica de sus unidades y obtener un mejor aprovechamiento del recurso hídrico.

Aracayo (2019), nos indica que: en época de estiaje, el despacho de una central generadora con embalse de regulación, es un problema complejo, si se considera de manera independiente los grupos de generación y el comportamiento no lineal de la presa de regulación y que, mediante un modelo de optimización del despacho es posible sacar un mejor provecho del recurso hídrico, de acuerdo con las características de eficiencia de cada grupo generador y los cambios de volumen de la presa reguladora. Zakariazadeh et al. (2014) propone usar más eficientemente las fuentes energéticas, disponibles para la generación de electricidad, reduciendo costos productivos. De manera similar, el trabajo de investigación, desarrollará el modelo más óptimo de aprovechamiento del caudal disponible para la generación, incrementando no solamente la producción de hidroenergía, sino también los beneficios económicos provenientes de la comercialización de la energía "extra" producida (Liu et al., 2022).

Vallejo-correa y Barrera-singaña (2022), nos dice que el despacho económico hidrotérmico tiene como principal objetivo el buscar minimizar el costo total de generación, teniendo en cuenta el conjunto de restricciones operativas que puedan tener los grupos generadores térmicos e hidráulicos y siendo la energía hidroeléctrica la base de la matriz energética nacional, por ser la más económica, al optimizar el despacho de energía se incrementa la producción; por lo tanto, se reduce el costo total de generación (Tseng et al., 2022). Para resolver nuestro problema de optimización, debemos encontrar los valores de las variables,



mediante los cuales se logre maximizar el rendimiento de nuestro sistema; teniendo en cuenta que las restricciones se deben respetar en todo momento (Ramos et al., 2010). Es posible que al realizar el modelado de la operación y rendimiento de los grupos hidroeléctricos de la CHSGII, GAMS nos ofrezca varias alternativas de solución a nuestro problema de optimización; por lo que, será decisión del operador, en base a la experiencia y a las pruebas realizadas, elegir la mejor alternativa (Hajiamoosha et al., 2021).



CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. A Nivel Internacional

La tendencia mundial, en cuanto al consumo de energía, viene experimentando una transición hacia el uso de fuentes de generación más limpias y amigables con el medio ambiente; principalmente a las energías renovables como la energía eólica, solar e hidráulica; siendo esta última la más flexible y confiable; debido a, la intermitencia de las energías solares y eólicas.

1.1.2. A Nivel Nacional

En el Perú, la energía hidráulica representa más del 50% de la generación total. La diversidad geográfica del país ofrece un alto potencial hidroeléctrico; sin embargo, las cuencas hidrográficas, se encuentran alejadas de los centros de consumo, lo que dificulta e incrementa los costos de nuevos proyectos hidroenergéticos; por ello, debemos voltear



la mirada a las centrales hidroeléctricas que ya forman parte del sistema eléctrico nacional y, buscar la manera de optimizar su producción.

Para hacernos una idea de la importancia de la energía hidroeléctrica en el Perú, remitámonos a la información que el Comité de la Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional (COES), pone a disposición en el Informe de la Operación Anual 2024 del SEIN; donde se indica que, el total de la producción de energía eléctrica de las empresas generadoras integrantes del COES en el año 2024 fue de 60,028.69 GWh y, la producción de electricidad con centrales hidroeléctricas durante dicho año, fue de 30,810.99 GWh, que representa el 51.33 % de la producción total de energía (COES - SINAC, 2025). Como vemos, la generación hidroeléctrica ocupa un lugar preponderante en nuestra matriz energética; por lo que, considero de suma importancia, optimizar el uso del recurso hídrico en la generación de energía eléctrica.

1.1.3. A Nivel Local

La central hidroeléctrica San Gabán II, cuenta con dos grupos generadores, conectados al SEIN; cada grupo entrega una potencia nominal de 55 MW, a plena carga; usando aproximadamente 19 m³/s de caudal de agua. Durante los meses de avenida (diciembre a mayo), el caudal del río es el suficiente para que la generación sea máxima de manera permanente, convirtiendo a la CHSGII en una central de pasada.

La central cuenta con un embalse regulador, cuya capacidad es de 145000 m³; el volumen almacenado permite regular la generación de



energía eléctrica en meses de estiaje (junio a noviembre). Durante los meses de estiaje, el caudal del río San Gabán baja hasta a 5 m³/s; por lo que, se restringe la generación de la CHSGII y el despacho de energía asignado por el COES, es asumido de manera equitativa por las unidades de generación; por ejemplo, si el COES solicita generar 70 MW, cada grupo tendrá la consigna de generar 35 MW. Sin embargo, se ha determinado, por experiencia, que el rendimiento de las unidades no es igual, ni constante a lo largo de toda la escala de generación; por lo que, asignar de manera igualitaria a ambos grupos, el despacho de energía, no es la manera más eficiente de usar el recurso hídrico.

1.2. JUSTIFICACIÓN

1.2.1. Justificación Teórica

En los últimos años, la demanda de energía en el país se ha incrementado considerablemente; esto debido principalmente al crecimiento económico, a los proyectos de inversión en minería, comercio e industria, servicios, conexiones domiciliarias, entre otros. Si bien es cierto que, uno de los principales efectos de la pandemia vivida durante los años 2020 y 2021 fue una aguda recesión económica que, se vio reflejada en una disminución de la demanda energética; en los años siguientes, se dio un efecto rebote que, no solamente trajo consigo un crecimiento económico acelerado, sino que, obviamente, la demanda de energía creció de manera similar.

1.2.2. Justificación Práctica

Para afrontar el crecimiento de la demanda de energía eléctrica, es necesario el ingreso de nuevas centrales de generación, pero debido a la complejidad de los proyectos energéticos, no es posible tener acceso de manera inmediata o en el corto plazo a dichas fuentes de energía; es por ello que, debemos voltear la mirada a las centrales de generación que actualmente se encuentran en servicio y, buscar la forma de incrementar la generación de energía eléctrica en dichas centrales.

Algunas alternativas que podemos mencionar son: afianzamiento del almacenamiento del recurso hídrico, instalación de grandes bancos de baterías para sistemas de generación eólica y solar, optimización del uso del recurso hídrico, optimización de las unidades de generación, entre otros.

El presente proyecto de tesis busca explorar la posibilidad de optimizar el uso del recurso hídrico, para la generación de energía de la CHSGII; en otras palabras, se busca incrementar la generación de energía de los grupos hidroeléctricos, haciendo uso del recurso hídrico disponible.

1.2.3. Justificación Metodológica

El presente trabajo de investigación, pretende optimizar el despacho de energía de los grupos de generación de la CHSGII, haciendo uso de técnicas como recolección de datos, modelamiento y optimización a través del uso del software GAMS (General Algebraic Modeling System) y finalmente, se evaluarán los resultados obtenidos.



De acuerdo con el modelado del rendimiento de los grupos, el software GAMS buscará el despacho más óptimo de energía, siendo las nuevas consignas de generación, en función al rendimiento de cada unidad; dejando de lado el antiguo criterio de dividir de manera igualitaria el despacho de energía. De esta manera, no solo se aprovechará más eficientemente el recurso hídrico disponible durante los meses de estiaje; sino que, se permitirá atender una mayor demanda de energía, incrementando la producción y los ingresos de la Empresa de Generación Eléctrica San Gabán S.A.

1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1. Problema General

¿Cómo optimizar el despacho de energía de los grupos de generación de la Central Hidroeléctrica San Gabán II, para un mejor aprovechamiento del recurso hídrico disponible durante los meses de estiaje?

1.3.2. Problemas Específicos

P.E. 1: ¿Cómo modelar y optimizar el despacho de energía de los grupos de generación de la Central Hidroeléctrica San Gabán II, durante los meses de estiaje, haciendo uso del software GAMS?

P.E. 2: ¿En cuánto se puede incrementar la producción de energía de la Central Hidroeléctrica San Gabán II, haciendo uso del modelo de optimización hallado con el software GAMS?



P.E. 3: ¿Cuál será el beneficio económico de aplicar el modelo de optimización hallado con software GAMS, al despacho de energía de los grupos de generación de la Central Hidroeléctrica San Gabán II?

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Optimizar el despacho de energía de los grupos de generación de la Central Hidroeléctrica San Gabán II, para un mejor aprovechamiento del recurso hídrico disponible durante los meses de estiaje.

1.4.2. Objetivos Específicos

O.E. 1: Modelar y optimizar, usando el software GAMS, el despacho de energía de los grupos de generación de la central hidroeléctrica San Gabán II, para un mejor uso del recurso hídrico disponible, durante los meses de estiaje.

O.E. 2: Determinar en cuánto se incrementa la producción de energía de la central hidroeléctrica San Gabán II, al aplicar el modelo de despacho de energía hallado con el software GAMS.

O.E. 3: Determinar el beneficio económico que representará el poner en práctica el modelo de optimización, hallado con el software GAMS, del despacho de energía de los grupos de generación de la central hidroeléctrica San Gabán II.



1.5. HIPÓTESIS

1.5.1. Hipótesis General

La optimización del despacho de energía de los grupos generadores de la Central Hidroeléctrica San Gabán II, nos permitirá un mejor aprovechamiento del recurso hídrico disponible durante los meses de estiaje.

1.5.2. Hipótesis Específicas

H.E. 1: Haciendo uso del software de modelamiento GAMS, se puede hallar un modelo de despacho de energía óptimo, para los grupos generadores de la Central Hidroeléctrica San Gabán II, que permita un mejor aprovechamiento del recurso hídrico disponible durante los meses de estiaje.

H.E. 2: Al aplicar el modelo de optimización, hallado con el software GAMS, se incrementará la producción de energía eléctrica de los grupos generadores de la Central Hidroeléctrica San Gabán II.

H.E. 3: Al aplicar el modelo de optimización, hallado con el software GAMS, se incrementará el beneficio económico, por venta de energía, de la Empresa de Generación Eléctrica San Gabán S.A.

1.6. PLANTEAMIENTO DE VARIABLES

1.6.1. Variable Independiente

- **Optimización del Despacho de Energía mediante GAMS:**

Aplicación de técnicas de optimización matemática, para la mejor



asignación de las consignas de generación de los grupos generadores de la CHSGII.

1.6.2. Variables Dependientes

- **Producción de Energía:** Cantidad de energía generada por los grupos hidroeléctricos de la CHSGII.
- **Aprovechamiento del Recurso Hídrico:** Eficiencia en el uso del agua disponible para generación de energía, durante los meses de estiaje.
- **Beneficio Económico:** Ganancia adicional para la EGESGSA, por venta de energía, producto del uso eficiente del recurso hídrico disponible durante los meses de estiaje.

1.6.3. Operacionalización de Variables

En la tabla 1, se presenta la operacionalización de variables.

Tabla 1

Operacionalización de Variables

Variables Independientes	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidades	Técnica	Instrumento
Optimización del despacho de energía mediante GAMS	Aplicación de técnicas de optimización de matemática para la mejor asignación de consignas de generación	Modelo en GAMS que optimiza caudal y potencia en estiaje	Gestión de caudal Asignación de potencia Estrategia de despacho	Caudal turbinado Potencia óptima	m ³ /s MW	Modelamiento matemático	Software GAMS
Variables Dependientes	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidades	Técnica	Instrumento
Producción de Energía	Cantidad de energía generada	Energía generada con modelo de despacho optimizado versus despacho convencional	Generación energética	Energía mensual Incremento (%)	MWh %	Simulación y análisis	Resultados en GAMS
Aprovechamiento del recurso hídrico	Eficiencia en uso del agua	Relación agua-energía optimizada	Eficiencia hidráulica	Volumen optimizado Rendimiento hidráulico	m ³ MWh/m ³	Simulación	Resultados en GAMS
Beneficio económico	Ganancia por energía adicional	Ingreso adicional por optimización	Rentabilidad	Ingreso mensual Incremento (%)	S/ %	Análisis económico	Resultados y datos de mercado



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. A Nivel Internacional

(Ledesma Guatarilla, 2017), en su tesis “Optimizando el Despacho de Energía en Sistema Eléctrico de Potencia”, nos presenta como objetivo principal el realizar la planificación a largo plazo, relacionada a la expansión de la generación para un sistema eléctrico de potencia; para lo cual se elabora un modelo de optimización que permita minimizar costos de inversión, operación, mantenimiento y administración, asociados a la generación de energía eléctrica.

(Pérez Mora, 2015), en su tesis titulada “Optimización del Despacho Hidrotérmico En El Corto Plazo Basado En El Modelo Programación Lineal Entera Mixta”, nos presenta la definición del modelo matemático permitiendo la optimización del despacho hidrotérmico, mediante el paquete de optimización GAMS (General Algebraic Modeling System),



facilitando la toma de decisiones para el operador del sistema. Plantea, además la resolución del problema del despacho económico en el cual se considera las restricciones inherentes a las unidades térmicas e hidráulicas, para el efecto desarrolla un despacho uninodal que considerará las restricciones propias de las centrales de generación y la demanda variante en el tiempo.

(Díaz Serna, 2011), en su tesis doctoral titulada "Optimización de la Operación y Evaluación de la Eficiencia Técnica de una Empresa de Generación Hidroeléctrica en Mercados de Corto Plazo", desarrolla una metodología de apoyo a la toma de decisiones para la optimización de la operación y la evaluación de la eficiencia técnica de una empresa de generación hidroeléctrica en mercados de electricidad de corto plazo. Esta metodología se expresa como un conjunto de algoritmos implementados en prototipos de software con aplicaciones a varios casos relacionados con dos sistemas de embalses en cascada de dimensiones realistas: uno, a lo largo de la cuenca del río Duero en España, y otro del Sistema Eléctrico Colombiano.

(Ramos et al., 2010), en su trabajo "Modelos Matemáticos de Optimización", nos presentan diferentes modelos para resolver problemas de optimización, poniendo especial énfasis en el desarrollo de modelos en GAMS, brindándonos diversos ejemplos de su aplicación; ejemplos que usaremos como base, para desarrollar nuestro propio modelo en GAMS.

2.1.2. A Nivel Nacional

(Trujillo Arana, 2021), en su tesis titulada "Optimización de la generación en la C.H. Cerro del Águila mediante el uso de curvas de eficiencia de sus unidades generadoras", desarrolla un modelo de optimización similar al propuesto en mi proyecto de investigación; pero el estudio se centra en los grupos generadores de la Central Hidroeléctrica Cerro del Águila. En primer lugar, se revisa las ecuaciones que rigen la producción de generación de potencia de una central hidráulica y los principales modelos de optimización aplicados para este tipo de ecuaciones, seleccionando el modelo más adecuado. Luego se procede a implementar el modelo de optimización en GAMS. Finalmente, se aplica el modelo a la central hidráulica de "Cerro del Águila" mostrándose y analizándose los resultados y los beneficios económicos luego de la implementación de dicho modelo. El mismo autor, en su tesis de maestría titulada "Análisis de la generación de potencia mediante el modelamiento de curvas de eficiencia para mejorar la performance en una central hidroeléctrica con turbina tipo Pelton", nos presenta un estudio similar, pero esta vez aplicado a la Central Hidroeléctrica de Carhuaquero.

(Aracayo Mendoza, 2019); en su tesis de maestría "Modelo de Optimización del Despacho en Estiaje de una Central Hidroeléctrica con Embalse de Regulación para el Mercado de Corto Plazo Mediante Programación No Lineal Entera Mixta", nos presenta como objetivo, el desarrollo de un modelo de optimización del despacho de energía, optimizando el recurso hídrico de acuerdo con las características de



eficiencia de cada unidad generadora y las variaciones de nivel (volumen) del embalse regulador.

(Rau Vargas, 2010), en su tesis "Despacho Económico Óptimo de Plantas de Generación Hidrotérmico en Sistemas de Energía Eléctrica", se plantea como objetivo principal, optimizar el despacho económico de las plantas de generación térmico e hidráulico mediante extensión de la optimización matemática lagrangiana minimizando costo, generación y pérdidas de energía teniendo en cuenta la capacidad de generación y límites de generación reactiva.

2.1.3. A Nivel Local

(Sucari Chávez, 2023), en su tesis "Diseño de un Sistema de Supervisión de la Generación de Energía Eólica en los Distritos de Puno y Juliaca Basado en el Modelo de Internet de las Cosas - 2023", se plantea como objetivo principal, diseñar un sistema de supervisión de la generación de energía eólica en los distritos de Puno y Juliaca basado en el modelo de Internet de las Cosas en el año 2023; así como, evaluar la optimización del rendimiento del sistema de generación, usando el método propuesto. Aquí vemos que la inquietud de optimizar la generación de energía, está presente incluso a pequeña escala, hecho que impulsa aún más el deseo de desarrollar la optimización del despacho de energía de los grupos generadores de la Central Hidroeléctrica San Gabán II; pues, con el desarrollo del modelo en GAMS, podremos optimizar la generación de energía a una escala mayor.

(Mamani Montesinos y Ramos Velez, 2018), los autores nos presentan un estudio de optimización del rendimiento del generador de vapor (caldera) del comedor de la Universidad Nacional del Altiplano, consiguiendo un incremento de la eficiencia de la caldera y por ende incrementando la energía producida; similar al resultado que se espera alcanzar con el desarrollo de la presente tesis; pues, se pretende optimizar el uso del recurso hídrico disponible en los meses de estiaje y con ello lograr un incremento en la producción de energía de la Central Hidroeléctrica San Gabán II.

(Cuenta Luque, 2017), en su tesis "Diseño y Simulación de un Sistema Energético Fotovoltaico con Control de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia para Proveer Energía Eléctrica Eficiente en la Región de Puno"; acorde con la tendencia mundial de generación distribuida, el autor nos muestra detalladamente el diseño, la implementación y simulación en el software Matlab/Simulink, de un sistema energético fotovoltaico con control de seguimiento del punto de máxima potencia para proveer energía eléctrica eficiente en la región de Puno, se prevé suministrar energía eléctrica a la vivienda durante las horas solares (día) e inyectar a la red eléctrica cuando se excede la demanda del consumo en la residencia. Con ello, queda demostrado que, en la actualidad tenemos muchas herramientas que nos ayudan a simular y modelar sistemas de energía; en el desarrollo de ésta tesis, el autor recurrió al uso del software Matlab/Simulink y, en mi caso, se hará uso del software de modelamiento y optimización llamado GAMS.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Central Hidroeléctrica San Gabán II

SAN GABAN es una planta hidráulica que tiene dos grupos. La reserva de agua es de 145000 m³. Hay un túnel de 7.2Km. conectado a una chimenea de equilibrio. El Salto de agua es de 644 m. El caudal nominal de un grupo es de 9.5 m³/s (19 m³/s por los dos grupos).

La reserva de agua es alimentada por el río San Gabán cuyo caudal está entre 5 y 200 m³/s. El caudal del río es superior a la capacidad máxima de la planta durante los meses de diciembre a abril.

La reserva del embalse permite funcionar solamente 4.5 horas a la potencia máxima. Cada grupo tiene una capacidad nominal de potencia de 63.5MVA.

Cada grupo puede entregar sin problemas de 0% a 100% de la potencia nominal sin problemas de vibraciones, y la cavitación no es importante.

En la sala de mando hay un sistema de supervisión y control (SCADA) que indica las señales de la planta y, desde el cual se controla la unidad en forma remota; este sistema es conocido como Symphony+.

La central eléctrica se divide en tres zonas fundamentales que son: Presa Derivadora, Casa de Máquinas y Sub Estación.

- **Presa Derivadora:** Esta estructura es utilizada para controlar el nivel del embalse de retención, tal que el flujo necesario pueda ser

conducido hacia la toma. El flujo de las avenidas debe ser controlado y las piedras, gravas y material flotante de desecho deben ser excluidos de la toma. El desarenador de cuatro naves es usado para mover las partículas abrasivas que son transportadas por el agua. El embalse de regulación es requerido para almacenar el agua empleada en la generación de energía eléctrica en las horas de punta. Es importante señalar que el embalse es limpiado con cierta periodicidad, para lo cual deben tomarse las provisiones necesarias para vaciar el embalse de regulación y permitir una limpieza regular de sedimentos. En la figura 1, se puede apreciar una vista panorámica de la presa derivadora de la C.H. San Gabán II.

Figura 1

Presa Derivadora de la CHSGII



A continuación, se describen las compuertas y el equipamiento asociado que encontramos en el área correspondiente a las Obras de Cabecera (presa derivadora) de la CHSGII.

Compuertas Radiales: Están instaladas cuatro compuertas radiales en la presa derivadora. Cada compuerta tendrá una clapeta superior para permitir remover el material flotante y controlar el nivel del agua. Cada clapeta es capaz de ser posicionada independientemente de las otras. Las clapetas tendrán divisores de flujo en la cresta para prevenir las vibraciones durante las condiciones de sobre flujo.

Un juego de ataguías es incluido para permitir el mantenimiento de las compuertas radiales. Una grúa pórtico sobre rieles es provista para la instalación de las ataguías y para complementar el izaje de las compuertas radiales para el mantenimiento de los sellos.

Una viga de izaje completa (pescadora) con accesorios y mecanismo de enganche es suministrada para transportar e instalar el juego de ataguías y para complementar el izaje de las compuertas radiales para el mantenimiento de los sellos.

Para operar la compuerta radial se utilizan 2 cilindros hidráulicos. Así también para operar la clapeta se usa un cilindro hidráulico.

- Toma y Desarenador: El agua es captada a través de rejillas coladeras, con un espaciamiento de barras de 3 cm, las cuales

excluirán los materiales que causen daño a los inyectores de las turbinas. Se cuenta con cuatro canales de aproximación uno para cada nave del desarenador. El flujo para cada nave es controlado por una compuerta de toma operada por un cilindro hidráulico. Esta compuerta se baja por completo para permitir que el desarenador sea drenado para su limpieza. Una nave del desarenador puede ser drenada en cualquier momento.

- Ducto Desgravador: Se cuenta con un ducto de derivación bajo la compuerta de toma para derivar el material de acarreo durante las avenidas. Este ducto es controlado por dos compuertas de descarga en una cámara de compuertas. La compuerta está hecha de fundición con marco de acero.
- Entrada al Embalse de Regulación y "BY PASS": El agua fluye a través de las naves del desarenador hacia un embalse de regulación. Se emplean ataguías para dirigir al flujo tanto al embalse de regulación como al "by pass". El cambio de flujo del embalse de regulación al "by pass" ocurrirá solamente cuando el embalse necesite limpieza. Esto es hecho de una a dos veces por año.
- Embalse de Regulación: Se requiere del embalse de regulación para almacenar el agua diariamente para la generación durante las horas de punta. Debido a que los sedimentos contenidos por el agua no serán retirados completamente por el desarenador



el embalse deberá ser limpiado y drenado cada cierto tiempo.

El mantenimiento del embalse asegura un desgaste mínimo de las turbinas. Se cuenta con una compuerta de purga en el embalse de regulación para permitir que la arena sea retirada

- Elementos de Control: Debido a la importancia que tiene el conocer los niveles de caudal para limitar los niveles de potencia. Se cuenta con instrumentos de medida que envían la información necesaria como caudal, altura de nivel de agua, y otros, mediante transmisión telemétrica a la sala de control y mando y a la casa de máquinas en Tunquini.

- **Casa de Máquinas**

- Turbinas: La Casa de Máquinas cuenta con dos turbinas Pelton (NEYRPIC). El grupo Turbina Generador es de eje vertical, por requerir menor espacio, lo que resulta importante considerando que la casa de máquinas está ubicada en una caverna.

Actualmente se usan cinco chorros de agua a una velocidad de 514.3 RPM (nominalmente), que corresponden a 14 pares de polos para cada generador. La potencia nominal en el eje de cada turbina es de 55 MW.

Cada turbina está acoplada a un generador de 63 MVA (nominal), con una velocidad de rotación de 514.3 RPM. Las turbinas operan con un rendimiento óptimo de 92%.

En la Figura 2, se pueden apreciar el conjunto de turbina Pelton, inyectores y deflectores, con que cuenta cada grupo generador de la C.H. San Gabán

Figura 2

Turbina Pelton, Inyectores y Deflectores



A continuación, nos ocuparemos de algunos de los componentes auxiliares de la turbina:

- Cojinete y Eje de la Turbina: Las turbinas incluyen un cojinete con juntas herméticas. El cojinete es lubricado por circulación de aceite



La turbina está suspendida del cojinete de empuje situado sobre el generador y que soporta también la parte giratoria de este último. El soporte de todo el grupo es anti-sísmico.

El eje de la turbina es de acero forjado y tiene dos bridas de acoplamiento forjadas, una para la rueda motriz y otra para el generador.

- Rodete de la Turbina: La rueda motriz es de acero inoxidable con 13% de cromo y 4% de níquel, con las superficies de las cucharas cuidadosamente pulidas.
- Repartidor de Inyectores: Los inyectores son alimentados por un repartidor de forma aproximadamente a la de un espiral. Dicho repartidor está embebido en concreto.
- Inyectores y Deflectores: Los inyectores serán controlados por servomotores internos. Asimismo, cada chorro cuenta con un deflector que es operado por un servomotor separado.

Ya que los inyectores están expuestos a la erosión, las agujas, los anillos son reemplazables. Los materiales básicos son resistentes a la erosión y adicionalmente cuentan con recubrimientos cerámicos.

- Válvulas de Cierre: Cada derivación del conducto forzado está equipado de una válvula esférica de 1.10m de diámetro. El accionamiento de la válvula esférica es mediante el uso de grupos oleo hídricos independientes.

Las válvulas obturan el conducto no solamente durante las paradas normales de las turbinas, sino además cuando el caudal sobrepase el absorbido normalmente por las turbinas y en caso de embalamiento de las mismas.

Un bloque hidráulico impide la apertura de la válvula hasta que el repartidor y los inyectores se hayan llenado de agua por el "by pass". El control de la válvula y del "by pass" se efectúa automáticamente.

El cuerpo de la válvula está formado por dos partes hemisféricas, ensambladas mediante pernos.

Las válvulas están equipadas de un dispositivo de mando de apertura y cierre a distancia. El disparo se provoca desde la sala de mando

- Generadores: La CHSGII cuenta con dos generadores de la marca ALSTOM que presentan las características siguientes:

Tabla 2

Características de los Generadores de la CHSGII

Marca	ALSTOM. (Francia)
Año de Fabricación:	1998.
Tensión Nominal :	13.8 Kv.
Potencia Aparente Nominal:	63.5 MVA.
Factor de Potencia:	0.85
Corriente Nominal:	2657 A.

Frecuencia:	60 Hz.	
Eficiencia:	95%.	
Velocidad:	514.3 RPM.	
Servicio:	Continuo.	
Excitación:	108V.	1208A.

- Transformadores de Potencia: Se cuenta con dos transformadores de potencia de fabricación italiana, los que tienen las siguientes características:

Tabla 3

Características de los Transformadores de Potencia de la CHSGII

Marca	VERBANO (Italia)
Año:	1998.
Tipo:	OFWF – PARA INTERIOR.
Tensión Nominal AT:	146 Kv.
Tensión Nominal BT:	13.8Kv.
Corriente Nominal AT:	274 A.
Corriente Nominal BT:	2615 A.
Grupo de Conexión:	YNd5.
Potencia Nominal:	62.5 MVA.
Frecuencia:	60 Hz.

- **Sub Estación**
 - Centro de Control: Es el lugar de donde se controla el proceso de generación de energía, desde aquí se realiza un seguimiento constante a todos los procesos que intervienen en la generación. Para realizar esta tarea se cuenta con un moderno sistema

SCADA denominado SYMPHONY + (ABB) digital. Este equipo tiene cualidades únicas, debido a la flexibilidad y facilidad de control y mando, así como de recolección de datos. Pero el elemento destacable es la presentación gráfica de curvas y mímicos (sinópticos), así como la velocidad de respuesta de este sistema de control y mando.

- Patio de Llaves: Aquí se encuentran ubicadas las barras de llegada de las ternas provenientes de casa de máquinas, y las barras de salida de las líneas L-1010, L-1013, L-1014, CL-SSAA, y CL-CWE.

Es aquí donde se efectúa la conexión del grupo de generación al sistema eléctrico.

- Sistema de Protección: La central cuenta también con un moderno sistema de protección contra fallas, constituido por modernos relés de protección a distancia en el caso de las líneas de transmisión contra problemas de sobretensión, cortocircuito fase-tierra, sobre frecuencia, etc.

2.2.2. Introducción al Software GAMS

Tarapuez Roa & Barrera Ardila, (2010), no dicen que: “El Sistema de Modelación Algebraica General o GAMS por sus siglas en inglés (General Algebraic Modeling System), fue diseñado especialmente para modelar sistemas lineales o no lineales, y para problemas de optimización. El



programa responde muy bien para sistemas de gran tamaño, ahorrándole tiempo al usuario del programa en cosas repetitivas, ya que el programa se ocupa de hacer iteraciones y demás operaciones matemáticas que normalmente consumen mucho tiempo. El programa permite que el usuario pueda manipular a su gusto las variables del problema, creando así, en pocos segundos, un nuevo resultado con las nuevas variables y comparándola con el resultado inicial, mostrando los cambios del sistema; también en poco tiempo se puede cambiar el tipo de modelo, de uno lineal a otro no lineal o se pueden modificar las ecuaciones principales del problema; todo esto se logra de una manera fácil y rápida".

GAMS es un lenguaje de programación, soportado por un paquete informático, nos especificar un problema de programación matemática independientemente del método de resolución asociado al mismo (Mar, 2000).

Además de poder describir el problema de nuestro interés GAMS puede llamar a los programas encargados de resolver el caso, siempre que estén dentro de su lista de resolutores (solvers) disponibles. GAMS nos permite incorporar nuevos programas para resolver determinados tipos de problemas (Mar, 2000).

- **Características de GAMS**

Como en todo proceso de solución de problemas, al usar GAMS es necesario completar varias fases.

Debemos empezar por tener una idea clara de que problema



queremos solucionar. En otras palabras, tenemos que determinar cuáles son las ecuaciones, variables y datos numéricos que manejaremos así como la estructura general del programa (Mar, 2000).

GAMS dispone principalmente de las siguientes estructuras de programación (Mar, 2000):

- Programación Lineal (LP), todas las variables son de tipo continuo y solamente se permiten relaciones lineales entre las mismas. La LP nos permite plantear problemas sencillos y alcanzar una solución óptima de una manera bastante segura y eficiente. Sin embargo, las capacidades de modelar con éste tipo de programación son menores a las que veremos más adelante (Mar, 2000).
- Programación Lineal Entera Mixta (MILP), las variables pueden ser de tipo continuo o discreto y solamente se permiten relaciones lineales entre las mismas. Con éste tipo de programación, se pueden tratar casos muy complejos de planificación, que tengan en cuenta una casuística compleja. La solución de este tipo de programas, depende del número y la influencia de las variables discretas consideradas. Para casos de gran número de variables existen numerosas técnicas heurísticas que permiten encontrar soluciones muy buenas, válidas pese a no ser la óptima en cada caso (Mar, 2000).

- Programación No Lineal (NLP), todas las variables son de tipo continuo y se permiten relaciones lineales y no lineales entre las mismas. Este tipo de programación es la más recomendable, para solucionar modelos de sistemas complejos. Sin embargo, debido a la complejidad de dichos problemas, por el elevado número de variables que usa esta programación, es posible que, a pesar de que exista una solución, GAMS no pueda hallarla (Mar, 2000).
- Programación No Lineal Entera Mixta (MINLP), las variables pueden ser de tipo continuo o discreto y se permiten relaciones lineales y no lineales entre las mismas. La mayor riqueza expresiva, y por ende la mayor dificultad en su tratamiento, la aporta la programación no lineal entera mixta (MINLP), que aúna las dificultades del tratamiento no lineal y del tratamiento de posibilidades discretas. Casos de incluso muy reducido tamaño pueden ser casi imposibles de resolver (Mar, 2000).

Una vez que tengamos claro, que tipo de problema y que programación vamos a usar, debemos escribir dicho problema en lenguaje GAMS, cuyo entorno de programación es muy sencillo y amigable al usuario. Existen diferentes maneras de escribir un mismo problema en lenguaje GAMS; sin embargo, para simplificar la solución y hallar la respuesta más óptima, es necesario llevar un correcto orden y en la medida de lo posible, simplificar el ingreso de datos, usando tablas.

La fase final, consiste en realizar las pasadas oportunas para obtener los resultados deseados. Una pasada consta de dos partes, una primera en la que GAMS analiza el archivo de datos que hemos preparado con el editor (compilación) y otra, si todo ha ido bien el solver que GAMS tenga que invocar para solucionar el pase lo completa (ejecución) (Mar, 2000).

La información que GAMS no ofrece al compilar un programa es abundante y normalmente no es fácil interpretar, es por ello que, es necesario tener un conocimiento claro de nuestro problema y cómo se comporta realmente este; si la solución no es la esperada o se aleja mucho del comportamiento real, GAMS nos permite hacer las correcciones que sean necesarias y realizar cuantas pruebas queramos, hasta que el resultado sea el esperado.

- **Partes de un Programa en GAMS**

De acuerdo a Marín (2000), un programa GAMS, generalmente cuenta con las siguientes partes:

- Cabecera del programa. Aquí se colocan ciertos comentarios descriptivos del programa, título, autores del mismo, información relativa a la versión etc.
- Opciones de programación. Los programadores activan o desactivan ciertas opciones generales de GAMS a su conveniencia. Estas opciones pueden especificar la forma en la que se enseñan los resultados, iteraciones máximas para los



algoritmos, declaración de símbolos especiales de comentarios, etc.

- Declaración de conjuntos. En muchas ocasiones los programas requieren que las variables, los parámetros y las ecuaciones sean descritos mediante subíndices. Así, por ejemplo, una ecuación de balance material puede ser requerida para cada elemento del conjunto de platos de una columna de destilación. También podemos tener la variable temperatura definida para cada plato. Es por ello por lo que en esta sección se especifican los diversos conjuntos a tener en cuenta y los elementos que a ellos pertenecen. Ciertos conjuntos pueden ser declarados como combinación de elementos de otros conjuntos. Así podemos tener, por ejemplo, si existen los conjuntos centros y procesos, un nuevo conjunto que diga que procesos consideramos en cada centro, no siendo válidas todas las posibles combinaciones de elementos entre ambos.
- Declaración de parámetros numéricos. Un programa además de tener variables y relaciones entre las mismas, es decir ecuaciones, ha de alimentarse de ciertos valores numéricos constantes que denominaremos parámetros. En su forma más sencillas estos parámetros serán constantes que no se ven afectadas por ningún subíndice. De forma más compleja podemos considerar uno o varios subíndices que afectan a un parámetro determinado. Los datos definidos pueden combinarse



mediante expresiones matemáticas para dar lugar a nuevos valores para otros parámetros.

- Declaración de variables. Aquí definiremos que variables vamos a emplear y de qué tipo es cada variable. Podremos también fijar los límites de las variables que queramos y especificar valores iniciales a considerar en los pases del solver.
- Declaración de ecuaciones. En esta parte se pueden definir las ecuaciones del modelo. Siempre es necesario definir un tipo especial de ecuación que es la función objetivo, que necesita de la participación de una variable especial que es la que hemos de maximizar o minimizar en el pase de optimización.
- Declaración de modelo. Normalmente a cada programa GAMS le va a corresponder un modelo. Sin embargo, podemos considerar varios modelos dentro de un programa GAMS. Cada modelo está definido por las ecuaciones que se consideran dentro del mismo.
- Lanzamiento del programa de optimización. Esta parte puede ser muy sencilla si solamente queremos lanzar el programa que resuelve el caso una vez. En otras ocasiones podemos querer realizar varias llamadas a diferentes resolvedores o solvers con diferentes modelos, realizando operaciones intermedias con los datos o los valores iniciales de las variables, incluyendo bucles

y condiciones. Esto puede valer para implementar complejos algoritmos de optimización.

- Informes de resultados. En este caso podemos optar por tener los informes que GAMS prepara de forma automática o bien podemos darle instrucciones para preparar nuestros propios informes en el archivo de salida o en diversos archivos a nuestra conveniencia.

No es necesario que las partes descritas en los párrafos anteriores tengan el mismo orden, con que fueron detalladas; esto dependerá del criterio de cada programador. Sin embargo, hay que tener en cuenta que no se puede usar un símbolo dentro del programa que no haya sido declarado con anterioridad (Mar, 2000).

2.2.3. Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SINAC)

El COES - SINAC (2001) define el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional del Perú, en su Glosario de Abreviaturas y Definiciones Utilizadas en los Procedimientos Técnicos del COES – SINAC, como: Conjunto de líneas de transmisión y subestaciones eléctricas conectadas entre sí, así como sus respectivos centros de despacho de carga, el cual permite la transferencia de energía eléctrica entre los diversos sistemas de generación, pertenecientes a los integrantes del COES”.

El sistema eléctrico interconectado peruano, es abastecido en gran mayoría por generación hidráulica; así como, por energía generada a partir de fuentes fósiles, como el gas natural, diésel, carbón, etc. Así



mismo, en el transcurso de los últimos años se incentivó la inversión en generación de energía eléctrica a partir de Recursos Energéticos Renovables (RER), dichas centrales aprovechan recursos como el viento y la radiación solar; además, las centrales hidroeléctricas, cuya potencia instalada sea menor o igual a 20 MW, son también consideradas como energías RER.

Las condiciones políticas y económicas del Perú garantizan y justifican plenamente las inversiones en electricidad, la cual enmarcada por una comercialización efectuada en condiciones de mercado libre y competitivo permite un desarrollo dinámico del sector. De esta forma, mediante la Ley de Concesiones Eléctricas N° 25844, promulgada en noviembre de 1992, se define varios tipos de transacciones en el mercado eléctrico donde se destacan (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), 2011):

- Mercado libre, para las transacciones entre clientes mayores, definidos actualmente como aquellos con demandas superiores a 200 kW (Ley de concesiones eléctricas, 1992).
- Mercado de oportunidades (spot), para transacciones puntuales, realizadas en circunstancia de demanda y/u oferta no previstas (Ley de concesiones eléctricas, 1992).
- Mercado inter-generadores, conformado por las negociaciones entre empresas generadoras de electricidad integrantes de un sistema eléctrico interconectado, cuyo despacho de carga es

efectuado por un Comité de Operación Económica del Sistema, (COES - SINAC) (Ley de concesiones eléctricas, 1992).

- Mercado de servicio público, destinado actualmente a clientes con consumo menores a 200 kW, siendo los precios máximos fijados por la Comisión de Tarifas Eléctricas "CTE" (Ley de concesiones eléctricas, 1992).

La Ley de Concesiones Eléctricas (1992) nos indica que las formas de ejercicio de la actividad eléctrica pueden ser desarrolladas por personas naturales o jurídicas, nacionales o extranjeras, públicas o privadas, mediante concesiones o autorizaciones. Se requiere concesión mediante contrato con el Estado, cuando se utiliza un recurso energético hidráulico o geotérmico para una potencia instalada superior a 10 MW; cuando la concesión requiere imposición de servidumbre para hacer uso de bienes del Estado o de terceros en los proyectos de líneas de transmisión; o cuando se efectúa la distribución de electricidad para el servicio público con una demanda superior a 0.5 MW. De modo similar se requieren de autorizaciones del Estado, cuando se desarrollan actividades de generación termoeléctricas, independientemente del recurso energético primario, y la capacidad instalada sea igual o mayor a 0.5 MW; así como cuando se utilicen recursos hidráulicos o geotérmicos y la capacidad instalada sea superior a los 0.5 MW e igual o inferior a 10 MW. Cuando la potencia instalada sea menor a

0.5 MW, solo es necesario informar al Ministerio de Energía y Minas (MINEM), el inicio de la operación.

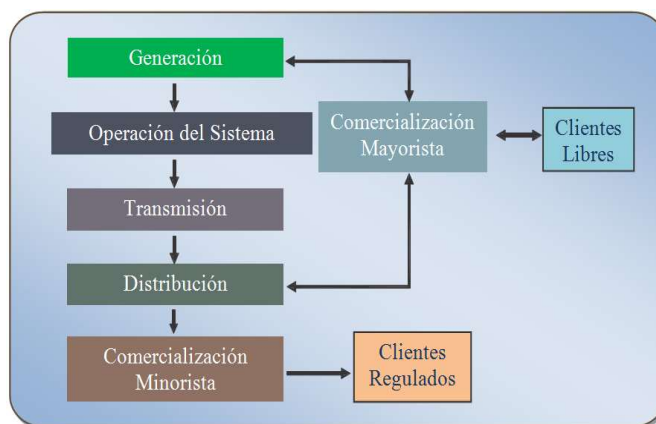
2.2.4. Componentes del SEIN

El sistema eléctrico interconectado peruano, se conforma básicamente por tres áreas operativas, las cuales son: área norte, área centro y área sur, las cuales se encuentran interconectadas con los enlaces de transmisión Paramonga – Chimbote, en el caso de las áreas norte y centro, y la interconexión Mantaro – Socabaya en el caso de las áreas centro y sur. Pese a los esfuerzos por tener un sistema interconectado al 100% en todo el Perú, aún existen sistemas aislados, no enlazados al SEIN (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), 2011).

En la figura 3, se aprecia las actividades que se desarrollan en el sistema eléctrico interconectado peruano.

Figura 3

Actividades Desarrolladas en el SEIN



Fuente: (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), 2011)

Las actividades que se desarrollan en el sector eléctrico peruano, desde el punto de vista técnico-económico, comprenden (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), 2011):

- **Generación:** Formado por las empresas eléctricas propietarias de centrales generadoras (hidráulicas, térmicas, fotovoltaicas y eólicas) de electricidad. Las empresas generadoras compiten entre sí, para captar a los clientes libres (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), 2011).
- **Transmisión:** La transmisión de energía eléctrica en el Perú se realiza a través del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), 2011).

Generalmente, la carga se encuentra alejada de las centrales de generación; por lo que, para poder entregar la energía a los usuarios, se hace uso del sistema de transmisión eléctrica. Nuestro sistema de transmisión está compuesto por líneas de transmisión en alta tensión (500 kV, 220 kV, 138 kV, 60 kV), en media tensión (33 kV, 22.9 kV, 13.8 kV); también son componentes del sistema de transmisión, las subestaciones de transformación, torres de transmisión, entre otras instalaciones (Osinermin, 2017).

A diferencia de la generación, en la transmisión de energía, se presenta un monopolio natural; por lo que, la tarifa de transmisión de energía es regulada por el Estado, de manera tal, que se

garantice el retorno de las inversiones en transmisión; así como, un margen de ganancias (Osinerghmin, 2017).

Dadas las características de los sistemas eléctricos, resulta más económico, realizar inversiones en transmitir la energía; que transportar las fuentes de energía primaria hacia los puntos de demanda (Biggar y Hesamzadeh, 2014).

- **Distribución:** En el Perú, las empresas que se encargan de la distribución de energía, están conformadas tanto por capitales privados, como estatales y, al igual que en la transmisión, en la distribución se presenta un monopolio natural; ya que, técnica y económicamente hablando, no es factible tener más de un distribuidor para una zona de concesión determinada (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), 2011).

El sistema de distribución está conformado por línea, subestaciones y equipos de maniobra que permiten llevar la energía eléctrica hacia los consumidores finales (Osinerghmin, 2017).

- **Comercialización Eléctrica:** En el Perú, se divide en mercado mayorista y mercado minorista. La primera, se refiere principalmente a la comercialización que existe entre generadores y distribuidores además de las transacciones en el mercado libre; mientras que la segunda, se refiere a la comercialización que existe

con los usuarios regulados del servicio (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), 2011).

- **Tipos de Usuarios:** De acuerdo a la Ley de Concesiones Eléctricas (1992), el marco regulatorio peruano ha definido dos tipos de usuarios, los Clientes Regulados y los Clientes Libres o No Regulados, de acuerdo a la máxima demanda que consumen.
- **Clientes Regulados:** Son aquellos cuyo suministro de energía eléctrica está sujeta a regulación de precios por parte de la institución reguladora OSINERGMIN y corresponde a aquellos usuarios que tienen como límite de potencia máxima demanda de hasta 200 kW, y se encuentran ubicados dentro de la zona de concesión de la empresa distribuidora (Ley de concesiones eléctricas, 1992).
- **Clientes Libres:** Estos clientes, no están sujetos a los precios regulados, y que a través de un contrato pactan un precio libre de común acuerdo con sus suministradores (generadoras o distribuidoras) (Osinergrmin, 2017).

De acuerdo a Ley de Concesiones Eléctricas (1992), son clientes libres, los usuarios cuya demanda sea mayor o igual a 2.5 MW. Los usuarios cuya demanda oscile entre 200 kW y 2500 kW; tienen la facultad de poder elegir entre ser clientes libres o regulados.

- **Operador del Sistema Eléctrico Peruano:** Se encarga del despacho económico de electricidad; es decir, de programar y

coordinar la producción de las centrales, en orden de mérito con respecto a sus costos variables, hasta que se logre cubrir la demanda en cada momento.

En el Perú el operador del sistema es el Comité de Operación Económica del Sistema (COES - SINAC) (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), 2011).

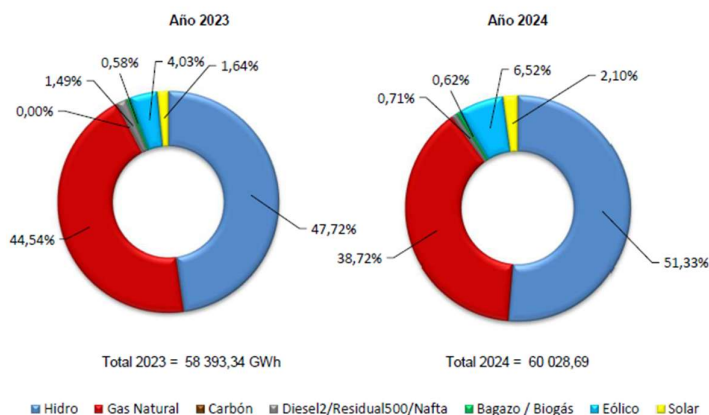
2.2.5. Producción de Energía en el SEIN durante el año 2024

La producción total de energía eléctrica de las empresas generadoras integrantes del COES en el año 2024 fue de 60,028.69 GWh y, de ésta energía, el 51.33% fue generada con centrales hidroeléctricas, cuya producción asciende a 30,810.99 GWh (COES - SINAC, 2025).

En la figura 4, se aprecia la producción por tipo de energía, para los años 2023 y 2024.

Figura 4

Producción de Energía en el SEIN en los años 2023 y 2024



Fuente: (COES - SINAC, 2025)

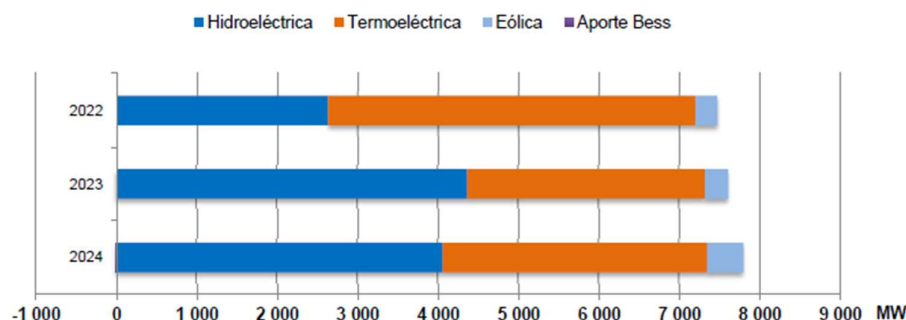
2.2.6. Análisis de la Demanda del SEIN

La máxima demanda del sistema eléctrico interconectado nacional durante el año 2024 fue de 7 794.008 MW, la misma que fue superior en 2.48% a la máxima demanda del año 2023 (7 605.506 MW) (COES - SINAC, 2025).

En la figura 5, se aprecia la evolución de las máximas demandas de los últimos 3 años.

Figura 5

Demanda Máxima en el SEIN Durante los años 2022, 2023 y 2024



Fuente: (COES - SINAC, 2025)

2.2.7. Costos Marginales Promedio del SEIN (US\$ / MWh)

La evolución de los costos marginales promedio ponderado del SEIN, se muestran en la tabla 4; tomando como referencia la Barra de Santa Rosa.

Tabla 4

Costos Marginales Promedio del SEIN de los años 2023 y 2024

Mes	2024 (US\$/MWh)	2023 (US\$/MWh)	Var. (%)
enero	30.70	30.79	-0.3%
febrero	34.37	30.32	13.3%



Mes	2024 (US\$/MWh)	2023 (US\$/MWh)	Var. (%)
marzo	26.57	34.57	-22.5%
abril	24.73	42.10	-41.3%
mayo	27.24	57.27	-52.4%
junio	40.68	92.35	-56.0%
julio	34.53	149.25	-76.9%
agosto	30.01	170.17	-82.4%
setiembre	31.24	179.13	-82.6%
octubre	31.62	38.02	-16.8%
noviembre	28.33	30.42	-6.9%
diciembre	23.22	27.03	-14.1%

Fuente: (COES - SINAC, 2025)



CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

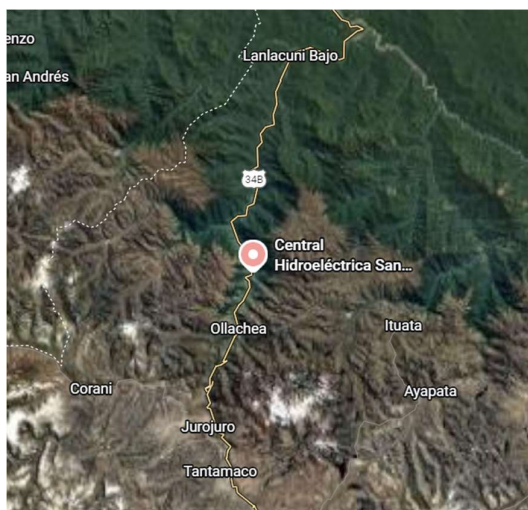
3.1. ÁMBITO O LUGAR DE ESTUDIO

El presente estudio se desarrolló durante el año 2024, entre los meses de junio a noviembre, periodo conocido como estiaje. Los datos del estudio fueron tomados de la Central Hidroeléctrica San Gabán II, que se ubica entre los distritos de Ollachea y San Gabán de la provincia Carabaya en la región Puno.

- Región : Puno
- Provincia : Carabaya
- Distritos : Ollachea y San Gabán
- Altitud : 1416 m.s.n.m.
- Ubigeo : 210309
- Latitud Sur : -13.70°
- Latitud Oeste : -70.45°

Figura 6

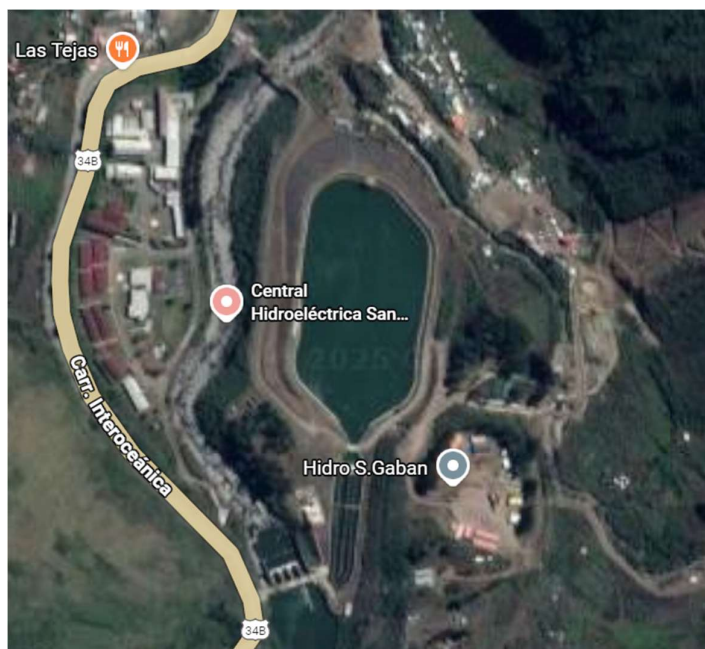
Ubicación Geográfica de la CHSGII



Fuente: Google maps

Figura 7

Vista Geográfica del Embalse Regulador de la CHSGII



Fuente: Google maps

3.2. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

3.2.1. Metodología

Primeramente, se realizó un estudio exhaustivo de la teoría existente sobre los procesos de generación de energía hidráulica, el mercado eléctrico peruano, métodos de optimización y uso del software GAMS. A continuación, se realizó la recolección de datos históricos, necesarios para el análisis y modelamiento en el software GAMS; para ello, se recurrió a la base de datos disponible en la CHSGII. Posteriormente se realizó el modelo en GAMS y, luego de realizar las pruebas necesarias, se determinó el modelo más óptimo de despacho de energía de los grupos generadores de la CHSGII. Finalmente, se realizaron las pruebas experimentales del modelo propuesto y el análisis de los datos obtenidos. Por ello, podemos decir que el método usado es la **PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA DETERMINÍSTICA**.

3.2.2. Nivel y Tipo de Investigación

Debido a que el presente proyecto de tesis, tiene como objetivo principal optimizar el despacho de energía de los grupos generadores de la CHSGII, el nivel de la investigación es **EXPLICATIVO**, porque se busca explicar y demostrar cómo la aplicación de un modelo de optimización con GAMS mejora el desempeño en el despacho de energía. Además, es **PREDICTIVO**; ya que, al hacer uso del modelo de optimización, se generará escenarios de operación y despacho de la C.H. San Gabán II. En cuanto al tipo de investigación que se empleará será la **INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA APLICADA**. Éste tipo de

investigación, se enfoca en mejorar los procesos existentes, mediante el uso de tecnología; que en nuestro caso será, el uso de la herramienta GAMS.

3.2.3. Enfoque de la Investigación

Se usa un enfoque **CUANTITATIVO**; debido a que la investigación se basa en análisis de datos históricos, modelado matemático y simulación computacional para la optimización del despacho de energía.

3.2.4. Diseño de la Investigación

Diseño **NO EXPERIMENTAL**, de tipo **longitudinal**; ya que, no se manipulan las variables directamente, sino que se analizan datos reales de la C.H. San Gabán II y se aplican modelos matemáticos. Además, es de tipo **longitudinal**, porque se consideran datos de operación en un período de tiempo.

Además, se puede precisar como **descriptivo–correlacional** y **explicativo**, ya que, se describe las condiciones actuales de operación, se establece relaciones entre caudales, generación y eficiencia y se explica el impacto de la optimización en el despacho de energía.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.3.1. Población

La población del presente trabajo de investigación, estaría conformada por todas las centrales hidroeléctricas que, conforman el parque generador del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional – SEIN.

3.3.2. Muestra

Para la muestra, se está tomando los grupos generadores de la Central Hidroeléctrica San Gabán II; ello por conveniencia del autor; ya que, se tiene a disposición los datos históricos de la central; así como, se podrá hacer pruebas y análisis de resultados, directamente sobre el despacho de energía de los grupos generadores de la central.

3.4. MATERIALES Y HERRAMIENTAS

3.4.1. Central Hidroeléctrica San Gabán II (CHSGII)

La CHSGII es una planta hidráulica que tiene dos grupos generadores, cada uno con una potencia nominal de 55 MW. La reserva de agua es de 145 000 m³. Hay un túnel de 7.2 Km. conectado a una chimenea de equilibrio. El Salto de agua es de 644 m. El caudal nominal de un grupo es de 9.5 m³/s (19 m³/s por los dos grupos). La reserva de agua es alimentada por el río San Gabán cuyo caudal está entre 5 y 200 m³/s. El caudal del río es superior a la capacidad máxima de la planta durante los meses de diciembre a mayo. En la sala de mando hay un sistema de supervisión y control (SCADA) que indica las señales de la planta y, desde el cual se controla la unidad en forma remota; este sistema es conocido como Symphony +.

3.4.2. SCADA Symphony+ (S+)

El proceso de generación de energía se realiza en el centro de control de la CHSGII; desde aquí se realiza un seguimiento constante a todos los procesos que intervienen en la generación. Para realizar esta tarea se

cuenta con un moderno sistema SCADA denominado SYMPHONY+ (ABB) digital. Este equipo tiene cualidades únicas, debido a la flexibilidad y facilidad de control y mando, así como de recolección de datos. Pero el elemento destacable es la presentación gráfica de curvas y mímicos (sinópticos), así como la velocidad de respuesta de este sistema de control y mando.

3.4.3. Software GAMS

Para hallar el despacho más óptimo de energía, se usó el software GAMS. El sistema de modelado algebraico general (GAMS) es una herramienta, cuya finalidad es programación y optimización. GAMS se puede utilizar para resolver diferentes tipos de problemas de optimización, dentro de los cuales destaca la optimización de sistemas eléctricos de potencia; por ejemplo, el flujo óptimo de potencia en una red de transmisión y el despacho de energía (Soroudi, 2019). Romero (2017), nos dice que, GAMS como software para resolución de problemas de optimización y modelado, es una potente herramienta debido a su capacidad de indexación de variables y ecuaciones, permitiendo de manera sencilla el cambio de dimensiones del modelo, separando datos de resultados de una manera natural; además, permite detectar errores de consistencia en la definición y verificación del modelo. Por ello, GAMS resulta una herramienta más que útil, para optimizar la generación y despacho de energía de los grupos generadores de la CHSGII; además del hecho que, dicha herramienta ha sido ampliamente usada para éste tipo de

problemas de optimización, tal como se evidencia en Ledesma Guatarilla (2017).

3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

Para el desarrollo del proyecto de investigación, se usará lo siguiente:

- Información histórica (documentada) de la central hidroeléctrica San Gabán II.
- Scada Symphony +, que se encarga de la gestión de operación de la CHSGII.
- Registros de medidores de energía ION 7650, encargados de almacenar los datos de generación de energía de los grupos hidroeléctricos de la CHSGII.
- Relés de protección de los grupos hidroeléctricos de la C.H. San Gabán II.
- Software GAMS, para procesar datos y hallar el modelo más óptimo de despacho de energía de los grupos hidroeléctricos de la CHSGII.
- Computadoras portátiles y de escritorio, para procesamiento y análisis de datos.

3.6. PROCEDIMIENTOS

Los procedimientos a realizar serán los siguientes:

- Recolección de datos.
- Modelado y Optimización.
- Procesamiento de datos.
- Análisis de resultados.

3.7. INGENIERÍA DEL PROYECTO

3.7.1. Planteamiento del Modelo

El problema que se busca resolver es, hallar el modelo más óptimo de despacho de energía de los grupos generadores de la central hidroeléctrica San Gabán II que, nos permita un mejor aprovechamiento del recurso hídrico disponible durante los meses de estiaje.

Para alcanzar nuestro objetivo, debemos hallar las consignas de generación de cada unidad que nos permitan obtener un mejor aprovechamiento del recurso hídrico disponible; en otras palabras, que el rendimiento de cada grupo generador, sea el mayor posible; considerando las restricciones operativas de la CHSGII; así como, el cumplimiento del programa de despacho que el COES emite diariamente.

Para hallar la solución a nuestro problema de optimización, se utilizó el software GAMS; ésta herramienta nos permitió modelar el funcionamiento de los grupos hidroeléctricos de la CHSGII, definir nuestro objetivo, plantear las restricciones del sistema y hallar una solución que satisfaga nuestros requerimientos.

3.7.2. Estructura del Modelo

Empezaremos a estructurar el modelo, definiendo los "SET's", que son los bloques fundamentales de nuestro modelo; aquí definiremos la cantidad de unidades de generación (gh1 y gh2); así como, la cantidad de muestras que queremos evaluar, que en el caso de nuestro modelo estará definido por las consignas de generación que, de acuerdo a la

programación del COES, se realizan cada media hora, es decir, tendremos 48 periodos o tiempos definidos (t_1 a t_{48}). Finalmente, introduciremos un único bloque de programación de despacho (pr_1).

Continuando con la estructura del modelo, definiremos los "PARAMETROS" del mismo; aquí consideramos datos como la regulación primaria de frecuencia (RPF) asignada a la CHSGII, datos propios de cada grupo hidroeléctrico, tales como potencias máxima y mínima, caudal máximo; así como, los coeficientes que definen la ecuación característica de cada unidad de generación. También, introduciremos los datos correspondientes al programa diario de operación emitido por el COES que, como se dijo anteriormente serán 48 consignas de generación total para la CHSGII.

A continuación, definiremos las "VARIABLES" del modelo; en ésta etapa, se consideraron cuatro variables que son: rendimiento de cada unidad y rendimiento total, potencia generada por cada grupo hidroeléctrico y el caudal turbinado por cada unidad de generación.

Ahora pasamos a una de las etapas más importantes del modelo, la etapa de "ECUACIONES"; en primer lugar, definimos nuestra función objetivo, con esta ecuación, hallaremos el rendimiento total (R_{total}) de los grupos hidroeléctricos, éste dato nos representa la suma de los rendimientos individuales de las unidades de generación, para cada periodo o tiempo definido. Continuando con la definición de las ecuaciones del modelo, tenemos las ecuaciones de potencia de generación, reparto de



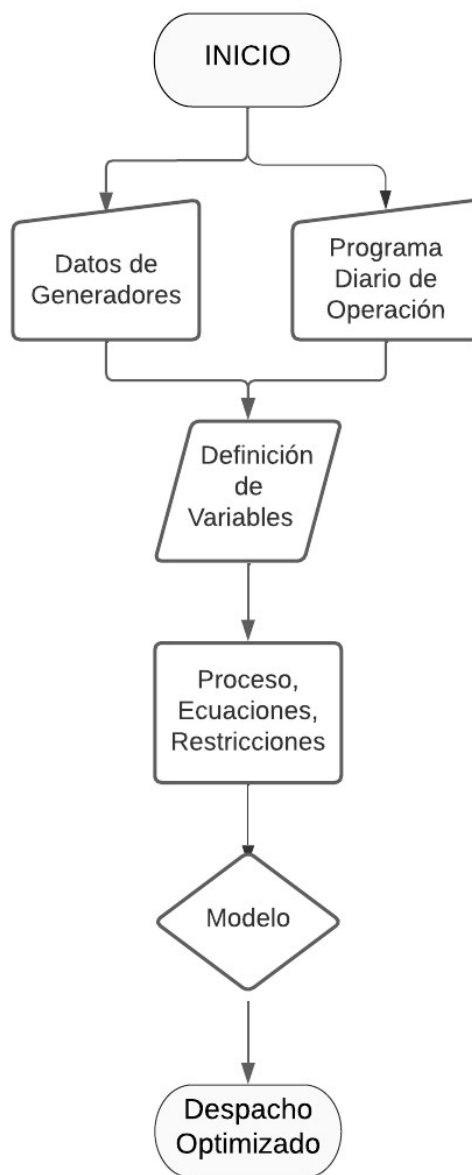
generación, rendimiento de cada grupo hidroeléctrico y, finalmente, restricciones, dadas por ecuaciones que representan las potencias máximas y mínimas permitidas para cada unidad.

Finalmente, definimos nuestro modelo y las ecuaciones que deseamos solucionar; así como, la estructura de programación a usar para hallar la solución a nuestro modelo; en nuestro caso, por el tipo de ecuaciones y variables empleadas, trabajamos con el modelo de programación no lineal (NLP). Es importante definir que, la solución esperada del modelo, estará dada al encontrar el máximo rendimiento total, con el cual se satisfaga la programación del COES y a su vez, se cumpla con las restricciones propias del sistema.

En la figura 8, se presenta el diagrama de flujo simplificado, del modelo de despacho optimizado de generación de los grupos generadores de la central hidroeléctrica San Gabán II.

Figura 8

Diagrama de Flujo del modelo de optimización de despacho de los Grupos de la CHSGII



3.8. MODELO MATEMÁTICO DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

Como se mencionó en el número precedente, el modelo propuesto presenta una estructura genérica que contiene una función objetivo, la

cual se encuentra supeditada a restricciones lineales y no lineales; a su vez, dentro del modelo tenemos variables de entrada que también estarán sujetas a algunas restricciones propias del sistema y modelo propuesto.

Para dar solución al problema de optimización del despacho de energía de los grupos generadores de la CHSGII, haciendo un uso eficiente del recurso hídrico disponible durante los meses de estiaje; se plantean los aspectos siguientes:

3.8.1. Modelado del Rendimiento de los Grupos Generadores de la CHSGII

Para hallar las ecuaciones que representan el comportamiento de los grupos hidroeléctricos de la CHSGII, se utilizaron datos de medición de potencia activa y caudal turbinado por cada unidad; para ello, recurrimos a la base de datos del sistema SCADA Symphony +.

La cantidad de datos utilizados es superior a los 40 000; ya que, se tomaron datos de medida cada segundo, para consignas de potencia que varían dentro de todo el rango de generación de los grupos 1 y 2; teniendo siempre en cuenta las restricciones operativas de la CHSGII, como por ejemplo la potencia mínima de operación recomendada en los manuales de operación y el porcentaje de regulación primaria de frecuencia (RPF) asignado por el COES.

En la tabla 5, se presenta el resumen de las mediciones realizadas; en ella se puede observar la potencia activa generada y el caudal que turbinó cada unidad de generación.

Tabla 5

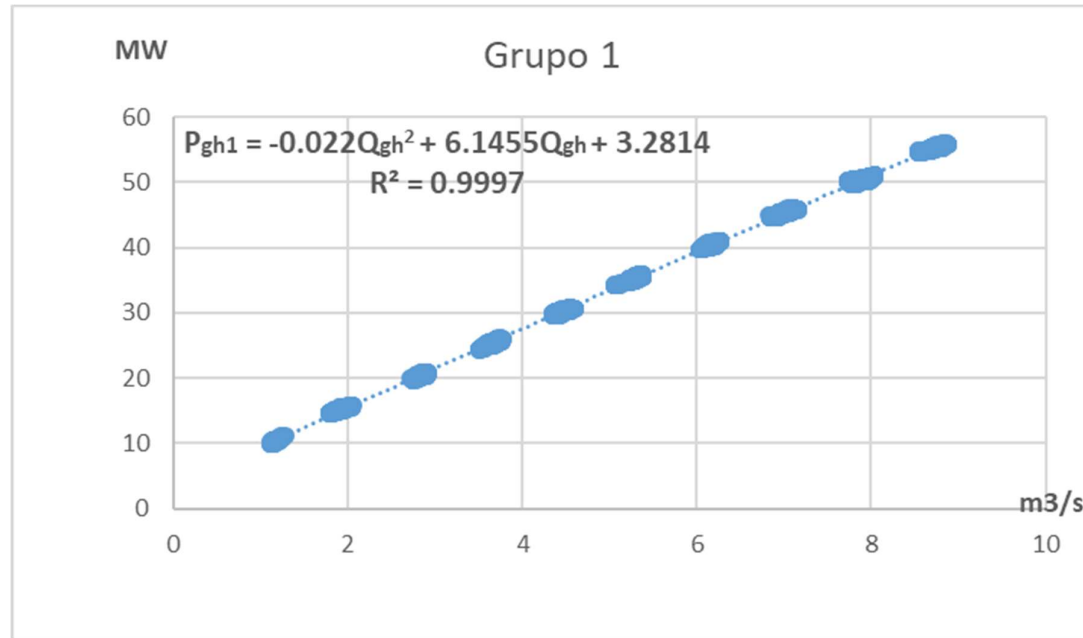
Resumen de Potencia Activa Generada Vs Caudal Turbinado

Grupo 1		Grupo 2	
Q _{gh1}	P _{gh1}	Q _{gh2}	P _{gh2}
[m ³ /s]	[MW]	[m ³ /s]	[MW]
1.17	10.45	1.61	10.20
1.95	15.30	1.68	10.21
2.80	20.05	2.45	15.56
2.85	20.48	2.57	15.15
3.61	25.03	3.15	20.03
3.66	25.54	3.19	20.55
3.70	25.51	3.88	25.15
4.42	30.21	3.99	25.43
4.46	30.11	4.65	30.32
4.50	30.20	4.70	30.30
5.24	35.17	5.34	35.00
5.31	35.20	5.39	35.02
6.12	40.08	5.44	35.16
6.18	40.17	6.10	40.03
7.00	45.17	6.20	40.25
7.08	45.58	6.93	45.24
7.78	50.20	6.99	45.18
7.81	50.13	7.01	45.50
7.87	50.32	7.71	50.26
7.92	50.33	7.78	50.09
8.69	55.18	8.57	55.21
8.79	55.54	8.60	55.13

En la figura 9, se presenta la gráfica de rendimiento; así como, las ecuaciones características del grupo hidroeléctrico 1; las mismas que fueron halladas con la totalidad de los datos medidos.

Figura 9

Gráfica de rendimiento y ecuación característica del Grupo 1 de la CHSGII



Así tenemos que, la ecuación característica del grupo 1 es:

$$P_{gh1} = -0.022 Q_{gh1}^2 + 6.1455 Q_{gh1} + 3.2814$$

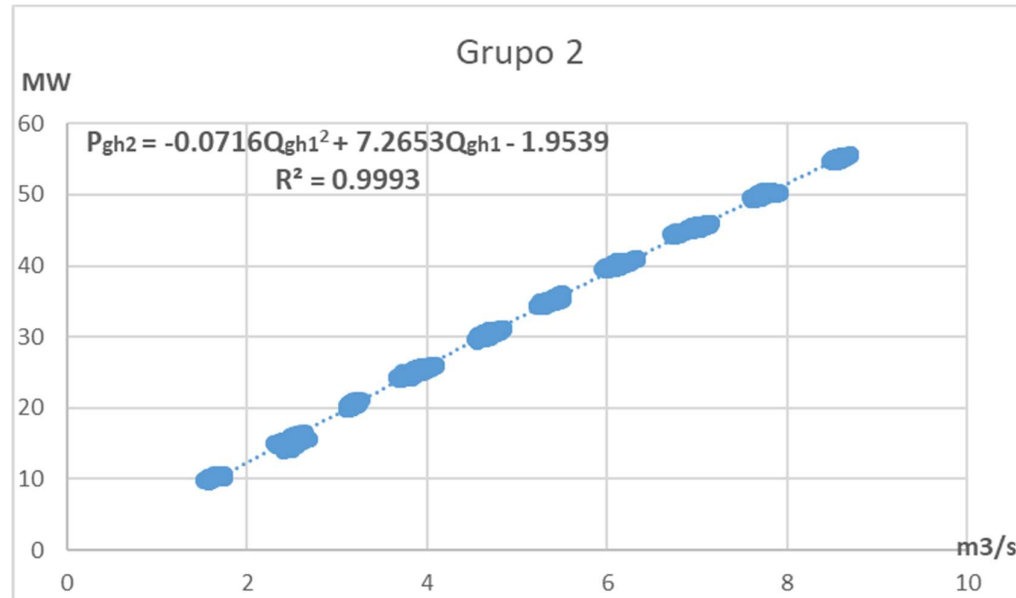
Donde:

- P_{gh1} : Potencia generada por el grupo hidroeléctrico 1.
- Q_{gh1} : Caudal turbinado por el grupo hidroeléctrico 1.
- R^2 : Coeficiente de determinación.

En la figura 10, se presenta la gráfica de rendimiento; así como, las ecuaciones características del grupo hidroeléctrico 2; las mismas que fueron halladas con la totalidad de los datos medidos.

Figura 10

Gráfica de rendimiento y ecuación característica del Grupo 2 de la CHSGII



Así tenemos que, la ecuación característica del grupo 1 es:

$$P_{gh2} = -0.0716 Q_{gh2}^2 + 7.2653 Q_{gh1} - 1.9539$$

Donde:

- P_{gh2} : Potencia generada por el grupo hidroeléctrico 2.
- Q_{gh2} : Caudal turbinado por el grupo hidroeléctrico 2.
- R^2 : Coeficiente de determinación.

3.8.2. Definición de la Función Objetivo

Nuestra función objetivo (FO) está dada por la maximización del rendimiento total (R_{total}) de los grupos generadores de la CHSGII; sujeta a las restricciones operacionales del sistema y a cumplir con el programa

de operación emitido por el COES. En tal sentido, la función objetivo del modelo propuesto estará expresada de la manera siguiente:

$$FO = \text{Max} (R_{total})$$

Donde:

- *FO: Función Objetivo.*
- *Rtotal: Rendimiento total.*

Para cada consigna de generación dada por el COES en el programa diario de operación, el modelo GAMS analizará que consignas individuales de generación, nos darán el máximo rendimiento para nuestro sistema. El rendimiento total estará dado por la sumatoria del rendimiento de cada grupo generador en cada periodo de programación del despacho de energía; es decir:

$$\begin{aligned} R_{total} = & (R_{gh1,t1} + R_{gh2,t1}) + (R_{gh1,t2} + R_{gh2,t2}) \\ & + (R_{gh1,t3} + R_{gh2,t3}) + \dots \\ & \dots + (R_{gh1,t46} + R_{gh2,t46}) + (R_{gh1,t47} + R_{gh2,t47}) \\ & + (R_{gh1,t48} + R_{gh2,t48}) \end{aligned}$$

Simplificando:

$$R_{total} = \sum_{gh=1}^2 \sum_{t=1}^{48} R_{gh,t}$$

Donde:

- *Rtotal: Rendimiento total.*

- $R_{gh,t}$: Rendimiento de cada unidad en el tiempo t ($P_{gh,t} / Q_{gh,t}$).
- gh : Grupo generador de la CHSGII.
- t : Programa diario de despacho del COES (cada 30 minutos).

Finalmente, podemos expresar nuestra función objetivo de la siguiente manera:

$$FO = \text{Max} \left(\sum_{gh=1}^2 \sum_{t=1}^{48} R_{gh,t} \right)$$

3.8.3. Definición de Restricciones para el Modelo Propuesto

El modelo propuesto, busca una solución que satisfaga nuestro problema de optimización; sin embargo, la respuesta estará delimitada por las restricciones de nuestro sistema.

Las restricciones que se consideraron para el modelo, son las siguientes:

- **Potencia máxima:** La potencia activa máxima que cada grupo generador puede entregar al sistema, es limitada por la potencia efectiva de operación; este dato es extraído del Informe de Prueba de Potencia Efectiva de la Central Hidroeléctrica San Gabán II (COES SINAC, 2016) y fue hallado en base a mediciones realizadas por personal especializado y certificado por personal del COES. Los grupos hidroeléctricos de la CHSGII tienen una potencia máxima o efectiva de **58.187 MW** para el grupo 1 y de **57.541 MW** para el grupo 2; estos datos pueden ser verificados en la página web del COES. Además, la potencia generada por cada grupo hidroeléctrico, también estará limitada por el porcentaje de regulación primaria de frecuencia

(RPF) asignada a la CHSGII, de acuerdo al estudio realizado por el COES.

Así tenemos que, la ecuación de restricción de potencia máxima, para los grupos generadores, estará definida de la siguiente manera:

$$P_{gh,t} \leq P_{max_{gh}} - RPF$$

$$P_{gh,t} \leq P_{max_{gh}} - (0.028 \times P_{max_{gh}})$$

Donde:

- $P_{gh,t}$: Potencia generada por el grupo hidroeléctrico, en el tiempo t .
 - $P_{max_{gh}}$: Potencia máxima del grupo hidroeléctrico.
 - RPF : Regulación primaria de frecuencia (2.8%).
- **Potencia mínima:** La potencia mínima que cada grupo hidroeléctrico puede entregar al sistema está, básicamente limitada por las restricciones operativas la CHSGII; de acuerdo al manual de operación y experiencia en la operación, de acuerdo con el Informe Técnico de Ensayo de la Potencia Mínima de la C.H. San Gabán (COES SINAC, 2021), la potencia mínima de operación para ambas unidades de generación es de **5 MW**.

$$P_{gh,t} \geq P_{min_{gh}}$$

Donde:

- $P_{gh,t}$: Potencia generada por el grupo hidroeléctrico, en el tiempo t .
- $P_{min_{gh}}$: Potencia mínima del grupo hidroeléctrico.

- **Caudal máximo:** El caudal máximo que cada grupo generador puede turbinar, está dado por el caudal registrado a potencia máxima, este dato es extraído del Informe de Prueba de Potencia Efectiva de la Central Hidroeléctrica San Gabán II (COES SINAC, 2016). De acuerdo a las mediciones realizadas para hallar la potencia efectiva de operación de las unidades, se tiene un caudal máximo de **10.07 m³/s** para el grupo 1 y de **9.81 m³/s** para el grupo 2.

Así tenemos, que la ecuación que representa la restricción de caudal máximo, está dada por:

$$Q_{gh,t} \leq Q_{max_{gh}}$$

Donde:

- $Q_{gh,t}$: Caudal turbinado por el grupo hidroeléctrico, en el tiempo t .
 - $Q_{max_{gh}}$: Caudal máximo del grupo hidroeléctrico.
- **Reparto de generación:** Las restricciones vistas hasta ahora, son propias de la CHSGII; sin embargo, para que nuestro modelo esté completo, debe cumplir también con las restricciones externas. En nuestro caso, se está tomando solo una restricción externa y, esta es que, para cada periodo definido, la generación total de la CHSGII, deber ser igual a la potencia de operación programada por el COES.

$$P_{gh1,t} + P_{gh2,t} = P_{prog_t}$$

Donde:

- $P_{gh1,t}$: Potencia generada por el grupo 1, en el tiempo t .

- $P_{gh2,t}$: Potencia generada por el grupo 2, en el tiempo t .
- $P_{prog,t}$: Potencia programada por el COES, en el tiempo t .

3.9. PROGRAMACIÓN EN GAMS DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN

En las secciones precedentes, vimos los pasos que se siguieron para poder realizar el modelamiento en el software de optimización GAMS; desde la estructura del modelo, la definición de variables, las ecuaciones que definen el comportamiento de los grupos generadores, las restricciones propias y externas a las que estará sujeto nuestro modelo; así como, la parte más importante, nuestra función objetivo.

Ahora, todas esas partes del modelo, deben ser plasmadas en GAMS, de acuerdo con su propio código.

Después de realizar muchas pruebas, desechar varias secciones de código, finalmente se llegó a uno que satisface por completo todos los requerimientos de la presente tesis; el mismo que, se presenta a continuación.

```
*****
*      OPTIMIZACIÓN CON GAMS DEL DESPACHO DE ENERGÍA      *
*      DE LOS GRUPOS DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL          *
*      HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II DURANTE                *
*      LOS MESES DE ESTIAJE                                *
*****

OPTION OPTCR=0.00001;
OPTION DECIMALS=1;
```



Set

gh Grupos de Generación de la C.H. San Gabán II /gh1*gh2/
t Consignas de Generación /t1*t48/
pr Consigna de Generación Programada por el COES /pr1*pr1/
;

Parameter

x Valor mín. para evitar error por div. entre 0 /0.00001/
RPF Regulación Primaria de Frecuencia (2.8%) /0.028/
;

Table CH(gh,*) Datos de los Grupos de la C.H. San Gabán II

	A	B	C	Pmax	Pmin	Qmax
*	[%/m3/seg]	[%/m3/seg]	[%/m3/seg]	[MW]	[MW]	[m3/seg]
gh1	-0.0220	6.1455	3.2814	58.187	5	10.07
gh2	-0.0716	7.2653	-1.9539	57.541	5	9.81;

Table

Prog(t,pr) Consigna de Generación Programada por el COES [MW]
\$call =xls2gms r=Desp_SG!B3:C51 i=Anexo1_Despacho.xlsx
o=Pr_Despacho.inc
\$include Pr_Despacho.inc
;

Variables

Rt Rendimiento Total de los Grupos de Generación [MW-m3-s]
p(gh,t) Potencia Generada de Cada Grupo [MW]
;

Positive Variables

q(gh,t) Caudal Turbinado por Cada Grupo [m3-s]
R(gh,t) Rendimiento de cada Grupo
;

Equations

Rtotal Rendimiento Total de los Grupos de Generación [MW-m3-s]

Potencia(gh,t) Potencia Generada por Cada Grupo [MW]

Reparto(t,pr) Balance de Potencia Medio Horario [MW]

* RepartoEqui(t) Reparto Equitativo de Potencia (quitar restricción Pmax y Pmin)

Pmax(gh,t) Límite de Potencia Máxima [MW]

Pmin(gh,t) Límite de Potencia Mínima [MW]

Rendimiento(gh,t) Rendimiento de cada Grupo

Qmax(gh,t) Límite de Caudal Máximo del Grupo 1 [m3-seg]

;

Rtotal.. $R_t = E = \sum[(gh,t), R(gh,t)];$

Potencia(gh,t).. $p(gh,t) = E = [CH(gh,'A')*\sqrt{q(gh,t)}] + [CH(gh,'B')*q(gh,t)] + CH(gh,'C');$

Reparto(t,pr).. $p('gh1',t) + p('gh2',t) = E = Prog(t,pr);$

*RepartoEqui(t).. $p('gh2',t) = E = p('gh1',t);$

Pmax(gh,t).. $p(gh,t) = L = [CH(gh,'Pmax')] - [CH(gh,'Pmax')*RPF];$

Pmin(gh,t).. $p(gh,t) = G = CH(gh,'Pmin') + [CH(gh,'Pmin')*RPF];$

Rendimiento(gh,t).. $R(gh,t) = E = p(gh,t) / [q(gh,t) + x];$

Qmax(gh,t).. $q(gh,t) = L = CH(gh,'Qmax');$

Model Despacho /all/;

Solve Despacho maximizing Rt using NLP;

execute_unload

'Despacho.gdx' p.l, q.l, R.l;

execute 'gdxviewer Despacho.gdx';

execute 'gdxrw.exe Despacho.gdx var=p.l rng=Potencias!';

execute 'gdxrw.exe Despacho.gdx var=q.l rng=Caudales!';

execute 'gdxrw.exe Despacho.gdx var=R.l rng=Rendimiento!';



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En éste capítulo, realizaremos una evaluación del modelo de optimización, los compararemos con los datos reales de generación y analizaremos los resultados obtenidos; para ello, haremos uso de los datos de generación de la CHSGII, durante un mes típico de estiaje que, para el presente estudio, será el mes de julio del año 2025.

Se realizarán simulaciones con escenario de repartición equitativa de la consigna de generación, comparándolos con las consignas optimizadas de generación que nos de nuestro modelo a través de los resultados del software GAMS.

4.1. EVALUACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN

4.1.1. Reparto Equitativo de la Consigna de Generación

En la Tabla 6, podemos observar los datos reales de generación, del 01 de noviembre del año 2025; al final de la tabla, tenemos que la energía generada durante el día fue de 1457.07 MWh, el costo marginal promedio, por cada megavatio de energía, fue de S/ 66.28.



Tabla 6

Datos de Generación del SCADA Symphony+

C.H. SAN GABÁN II					GENERACIÓN		COSTO	Ingresos	Consumo
HORA	Grupo 1		Grupo 2		TOTAL CENTRALES		MARGINAL BARRA SAN GABÁN 138 KV	C.H.SGII	Agua
	MW	Qtrb(m3/s)	MW	Qtrb(m3/s)	MW	Qtrb(m3/s)	Soles/MWh	Soles	m3
00:30	20.36	3.21	20.15	2.79	40.51	6.00	66.85	2,708.48	10800
01:00	20.59	3.25	20.51	2.83	41.11	6.08	66.88	2,749.04	10944
01:30	19.87	3.11	19.60	2.69	39.47	5.80	66.96	2,643.06	10440
02:00	19.89	3.14	19.83	2.72	39.72	5.86	66.56	2,643.66	10548
02:30	20.32	3.20	20.24	2.78	40.56	5.98	66.43	2,694.21	10764
03:00	19.73	3.08	19.79	2.66	39.53	5.74	67.23	2,657.24	10332
03:30	20.42	3.20	20.26	2.78	40.68	5.98	67.17	2,732.50	10764
04:00	20.20	3.19	20.26	2.77	40.46	5.96	66.63	2,695.80	10728
04:30	20.31	3.20	20.36	2.78	40.67	5.98	66.63	2,709.72	10764
05:00	20.69	3.24	20.62	2.82	41.30	6.06	66.67	2,753.60	10908
05:30	20.25	3.18	20.22	2.76	40.47	5.94	66.68	2,698.25	10692
06:00	19.26	2.98	19.15	2.56	38.41	5.54	66.66	2,560.34	9972
06:30	11.65	1.78	11.67	1.36	23.32	3.14	65.68	1,531.63	5652
07:00	10.98	1.68	11.03	1.26	22.01	2.94	65.59	1,443.70	5292
07:30	11.27	1.72	11.19	1.30	22.46	3.02	70.63	1,586.43	5436
08:00	10.91	1.77	11.45	1.35	22.36	3.12	70.02	1,565.63	5616
08:30	30.50	4.78	30.49	4.36	60.99	9.14	69.47	4,237.08	16452
09:00	31.10	4.90	31.12	4.48	62.22	9.38	69.99	4,354.66	16884
09:30	33.32	5.25	33.23	4.83	66.55	10.08	70.40	4,684.82	18144
10:00	33.48	5.25	33.41	4.83	66.89	10.08	70.25	4,699.25	18144
10:30	33.18	5.19	33.12	4.77	66.30	9.96	71.58	4,746.07	17928
11:00	33.11	5.19	33.23	4.77	66.34	9.96	70.20	4,656.82	17928
11:30	33.10	5.22	33.14	4.80	66.24	10.02	63.72	4,221.12	18036
12:00	33.54	5.28	32.75	4.86	66.29	10.14	63.80	4,229.53	18252
12:30	32.79	5.13	32.63	4.71	65.42	9.84	63.51	4,154.85	17712
13:00	33.39	5.25	33.42	4.83	66.81	10.08	63.57	4,246.94	18144
13:30	33.20	5.21	33.22	4.79	66.42	10.00	63.30	4,204.29	18000
14:00	33.36	5.22	33.31	4.80	66.67	10.02	64.33	4,289.03	18036
14:30	32.39	5.06	32.20	4.64	64.59	9.70	64.95	4,195.19	17460
15:00	31.20	4.88	31.20	4.46	62.40	9.34	65.18	4,067.28	16812
15:30	31.27	4.88	31.00	4.46	62.27	9.34	65.03	4,049.72	16812
16:00	31.10	4.89	30.89	4.47	61.99	9.36	66.13	4,099.22	16848
16:30	31.44	4.94	31.30	4.52	62.74	9.46	66.53	4,174.00	17028
17:00	31.31	4.91	31.31	4.49	62.62	9.40	63.26	3,961.09	16920
17:30	31.46	4.92	31.38	4.50	62.84	9.42	63.76	4,006.92	16956
18:00	31.03	4.87	30.90	4.45	61.93	9.32	65.49	4,055.87	16776
18:30	55.32	9.05	55.23	8.63	110.55	17.68	65.14	7,200.87	31824
19:00	55.13	9.05	55.03	8.63	110.16	17.68	65.96	7,266.18	31824
19:30	55.35	9.04	55.17	8.62	110.52	17.66	63.74	7,044.14	31788
20:00	40.30	6.36	40.08	5.94	80.38	12.30	65.62	5,274.21	22140
20:30	42.23	6.77	42.11	6.35	84.34	13.12	65.90	5,558.55	23616
21:00	55.42	9.11	55.23	8.69	110.65	17.80	64.84	7,173.81	32040
21:30	54.69	9.02	54.70	8.60	109.40	17.62	64.82	7,090.68	31716
22:00	55.42	9.14	55.35	8.72	110.77	17.86	65.08	7,209.43	32148
22:30	25.84	4.20	25.90	3.78	51.74	7.98	65.50	3,388.54	14364
23:00	28.44	4.52	28.47	4.10	56.91	8.62	65.78	3,743.96	15516
23:30	29.22	4.62	29.25	4.20	58.47	8.82	65.60	3,835.75	15876
00:00	29.34	4.66	29.36	4.24	58.70	8.90	65.86	3,865.59	16020
Total	729.35		727.72		1457.07		66.28	96179.37	797796

Con base en estos datos, encontramos que, el ingreso estimado por venta de energía, para la Empresa de Generación Eléctrica San Gabán S.A.,



fue de S/ 96 179.37. En cuanto al recurso hídrico, utilizado durante el día, para la generación, tenemos que se usó 797 796 m³ de agua.

Tabla 7

Datos de GAMS, Modelado de Despacho Equitativo

HORA	C.H. SAN GABÁN II				GENERACIÓN		COSTO	Ingresos	Consumo
	Grupo 1		Grupo 2		TOTAL CENTRALES		MARGINAL BARRA SAN GABÁN 138 KV	C.H.SGII	Agua
	MW	Qtrb(m3/s)	MW	Qtrb(m3/s)	MW	Qtrb(m3/s)	Soles/MW/h	Soles	m3
00:30	20.26	2.79	20.26	3.16	40.51	5.95	66.85	2,708.48	10701
01:00	20.55	2.84	20.55	3.20	41.11	6.04	66.88	2,749.04	10868
01:30	19.74	2.70	19.74	3.08	39.47	5.78	66.96	2,643.06	10409
02:00	19.86	2.72	19.86	3.10	39.72	5.82	66.56	2,643.66	10478
02:30	20.28	2.79	20.28	3.16	40.56	5.95	66.43	2,694.21	10714
03:00	19.76	2.71	19.76	3.08	39.53	5.79	67.23	2,657.24	10424
03:30	20.34	2.80	20.34	3.17	40.68	5.97	67.17	2,732.50	10749
04:00	20.23	2.79	20.23	3.15	40.46	5.94	66.63	2,695.80	10686
04:30	20.33	2.80	20.33	3.17	40.67	5.97	66.63	2,709.72	10745
05:00	20.65	2.86	20.65	3.21	41.30	6.07	66.67	2,753.60	10924
05:30	20.23	2.79	20.23	3.15	40.47	5.94	66.68	2,698.25	10689
06:00	19.21	2.62	19.21	3.00	38.41	5.62	66.66	2,560.34	10110
06:30	11.66	1.37	11.66	1.91	23.32	3.28	65.68	1,531.63	5904
07:00	11.01	1.26	11.01	1.82	22.01	3.08	65.59	1,443.70	5542
07:30	11.23	1.30	11.23	1.85	22.46	3.15	70.63	1,586.43	5666
08:00	11.18	1.29	11.18	1.84	22.36	3.13	70.02	1,565.63	5638
08:30	30.50	4.50	30.50	4.68	60.99	9.18	69.47	4,237.08	16530
09:00	31.11	4.60	31.11	4.78	62.22	9.38	69.99	4,354.66	16884
09:30	33.28	4.97	33.28	5.11	66.55	10.07	70.40	4,684.82	18135
10:00	33.45	5.00	33.45	5.13	66.89	10.13	70.25	4,699.25	18233
10:30	33.15	4.95	33.15	5.09	66.30	10.03	71.58	4,746.07	18062
11:00	33.17	4.95	33.17	5.09	66.34	10.04	70.20	4,656.82	18074
11:30	33.12	4.94	33.12	5.08	66.24	10.02	63.72	4,221.12	18045
12:00	33.15	4.95	33.15	5.09	66.29	10.03	63.80	4,229.53	18059
12:30	32.71	4.87	32.71	5.02	65.42	9.89	63.51	4,154.85	17808
13:00	33.41	4.99	33.41	5.13	66.81	10.12	63.57	4,246.94	18210
13:30	33.21	4.96	33.21	5.10	66.42	10.05	63.30	4,204.29	18097
14:00	33.34	4.98	33.34	5.12	66.67	10.09	64.33	4,289.03	18169
14:30	32.30	4.80	32.30	4.96	64.59	9.76	64.95	4,195.19	17568
15:00	31.20	4.62	31.20	4.79	62.40	9.41	65.18	4,067.28	16936
15:30	31.14	4.61	31.14	4.78	62.27	9.39	65.03	4,049.72	16898
16:00	31.00	4.58	31.00	4.76	61.99	9.34	66.13	4,099.22	16818
16:30	31.37	4.65	31.37	4.82	62.74	9.46	66.53	4,174.00	17034
17:00	31.31	4.64	31.31	4.81	62.62	9.44	63.26	3,961.09	16999
17:30	31.42	4.66	31.42	4.82	62.84	9.48	63.76	4,006.92	17063
18:00	30.97	4.58	30.97	4.75	61.93	9.33	65.49	4,055.87	16800
18:30	55.27	8.73	55.27	8.61	110.55	17.34	65.14	7,200.87	31212
19:00	55.08	8.70	55.08	8.57	110.16	17.27	65.96	7,266.18	31094
19:30	55.26	8.73	55.26	8.60	110.52	17.33	63.74	7,044.14	31203
20:00	40.19	6.14	40.19	6.18	80.38	12.32	65.62	5,274.21	22171
20:30	42.17	6.48	42.17	6.49	84.34	12.97	65.90	5,558.55	23340
21:00	55.32	8.74	55.32	8.62	110.65	17.36	64.84	7,173.81	31243
21:30	54.70	8.63	54.70	8.51	109.40	17.14	64.82	7,090.68	30861
22:00	55.39	8.75	55.39	8.63	110.77	17.38	65.08	7,209.43	31281
22:30	25.87	3.73	25.87	3.99	51.74	7.71	65.50	3,388.54	13880
23:00	28.46	4.16	28.46	4.37	56.91	8.53	65.78	3,743.96	15359
23:30	29.24	4.29	29.24	4.49	58.47	8.78	65.60	3,835.75	15806
00:00	29.35	4.31	29.35	4.51	58.70	8.82	65.86	3,865.59	15870
					1457.07		66.28	96,179.37	793988

En la Tabla 7, tenemos los datos generados por nuestro modelo de optimización, pero con un reparto equitativo; simplemente para comparar los datos obtenidos en GAMS, con los datos reales de despacho de la C.H. San Gabán II.

Realizando una comparación entre las dos tablas anteriores, podemos observar que, de acuerdo con lo esperado; no hay mucha diferencia entre el recurso hídrico ejecutado en el despacho real (Tabla 7) y el recurso hídrico simulado con GAMS (Tabla 8); al realizar un reparto equitativo de la consigna de generación, la diferencia es de apenas 3808 m³; que nos representaría un incremento de 6.99 MWh de energía; traducido en un ingreso adicional de S/ 463.17.

De acuerdo al párrafo precedente, podemos concluir que nuestro modelado en GAMS, es correcto; ya que, se ha comprobado que los resultados obtenidos con datos reales y los datos simulados, para iguales condiciones de reparto de consigna de generación (equitativo para ambos); son prácticamente iguales.

4.1.2. Reparto Optimizado de la Consigna de Generación

A continuación, presentamos el resultado de simular, con nuestro modelo en GAMS, el reparto optimizado de la consigna de generación; el modelo busca las combinaciones de reparto de consigna, que nos den el mayor rendimiento total posible, cumpliendo con las restricciones del COES y las restricciones propias de cada unidad de generación. Los datos optimizados serán comparados con los datos reales, obtenidos de los reportes del sistema SCADA Symphony+.



Tabla 8

Datos de GAMS, Modelado de Despacho Optimizado

C.H. SAN GABÁN II					GENERACIÓN		COSTO	Ingresos	Consumo
HORA	Grupo 1		Grupo 2		TOTAL CENTRALES		MARGINAL BARRA SAN GABÁN 138 KV	C.H.SGII	Agua
	MW	Qtrb(m3/s)	MW	Qtrb(m3/s)	MW	Qtrb(m3/s)	Soles/MW/h	Soles	m3
00:30	5.14	0.30	35.37	5.08	40.51	5.38	66.85	2,708.48	9685
01:00	5.14	0.30	35.97	5.17	41.11	5.47	66.88	2,749.04	9850
01:30	5.14	0.30	34.33	4.92	39.47	5.22	66.96	2,643.06	9398
02:00	5.14	0.30	34.58	4.96	39.72	5.26	66.56	2,643.66	9466
02:30	5.14	0.30	35.42	5.08	40.56	5.39	66.43	2,694.21	9698
03:00	5.14	0.30	34.39	4.93	39.53	5.23	67.23	2,657.24	9412
03:30	5.14	0.30	35.54	5.10	40.68	5.41	67.17	2,732.50	9733
04:00	5.14	0.30	35.32	5.07	40.46	5.37	66.63	2,695.80	9670
04:30	5.14	0.30	35.53	5.10	40.67	5.40	66.63	2,709.72	9729
05:00	5.14	0.30	36.16	5.20	41.30	5.50	66.67	2,753.60	9905
05:30	5.14	0.30	35.33	5.07	40.47	5.37	66.68	2,698.25	9673
06:00	5.14	0.30	33.27	4.76	38.41	5.06	66.66	2,560.34	9104
06:30	5.14	0.30	18.18	2.50	23.32	2.80	65.68	1,531.63	5047
07:00	5.14	0.30	16.87	2.31	22.01	2.61	65.59	1,443.70	4704
07:30	5.14	0.30	17.32	2.38	22.46	2.68	70.63	1,586.43	4822
08:00	5.14	0.30	17.22	2.36	22.36	2.66	70.02	1,565.63	4796
08:30	5.14	0.30	55.85	8.35	60.99	8.66	69.47	4,237.08	15580
09:00	6.29	0.49	55.93	8.37	62.22	8.86	69.99	4,354.66	15941
09:30	10.62	1.20	55.93	8.37	66.55	9.57	70.40	4,684.82	17217
10:00	10.96	1.26	55.93	8.37	66.89	9.62	70.25	4,699.25	17318
10:30	10.37	1.16	55.93	8.37	66.30	9.52	71.58	4,746.07	17143
11:00	10.41	1.16	55.93	8.37	66.34	9.53	70.20	4,656.82	17155
11:30	10.31	1.15	55.93	8.37	66.24	9.51	63.72	4,221.12	17126
12:00	10.36	1.16	55.93	8.37	66.29	9.52	63.80	4,229.53	17140
12:30	9.49	1.01	55.93	8.37	65.42	9.38	63.51	4,154.85	16884
13:00	10.88	1.24	55.93	8.37	66.81	9.61	63.57	4,246.94	17294
13:30	10.49	1.18	55.93	8.37	66.42	9.54	63.30	4,204.29	17179
14:00	10.74	1.22	55.93	8.37	66.67	9.58	64.33	4,289.03	17253
14:30	8.66	0.88	55.93	8.37	64.59	9.24	64.95	4,195.19	16639
15:00	6.47	0.52	55.93	8.37	62.40	8.89	65.18	4,067.28	15994
15:30	6.34	0.50	55.93	8.37	62.27	8.86	65.03	4,049.72	15956
16:00	6.06	0.45	55.93	8.37	61.99	8.82	66.13	4,099.22	15874
16:30	6.81	0.58	55.93	8.37	62.74	8.94	66.53	4,174.00	16094
17:00	6.69	0.56	55.93	8.37	62.62	8.92	63.26	3,961.09	16059
17:30	6.91	0.59	55.93	8.37	62.84	8.96	63.76	4,006.92	16124
18:00	6.00	0.44	55.93	8.37	61.93	8.81	65.49	4,055.87	15856
18:30	54.62	8.62	55.93	8.37	110.55	16.99	65.14	7,200.87	30573
19:00	54.23	8.55	55.93	8.37	110.16	16.92	65.96	7,266.18	30453
19:30	54.59	8.61	55.93	8.37	110.52	16.98	63.74	7,044.14	30564
20:00	24.45	3.49	55.93	8.37	80.38	11.85	65.62	5,274.21	21337
20:30	28.41	4.15	55.93	8.37	84.34	12.52	65.90	5,558.55	22531
21:00	54.72	8.64	55.93	8.37	110.65	17.00	64.84	7,173.81	30605
21:30	53.47	8.42	55.93	8.37	109.40	16.79	64.82	7,090.68	30214
22:00	54.84	8.66	55.93	8.37	110.77	17.02	65.08	7,209.43	30644
22:30	5.14	0.30	46.60	6.84	51.74	7.15	65.50	3,388.54	12861
23:00	5.14	0.30	51.77	7.68	56.91	7.98	65.78	3,743.96	14370
23:30	5.14	0.30	53.33	7.94	58.47	8.24	65.60	3,835.75	14830
00:00	5.14	0.30	53.56	7.97	58.70	8.28	65.86	3,865.59	14896
Total	326.06		1131.01		1457.07		66.28	96179.37	750394

En las Figuras 11 y 12, se aprecia la diferencia que existe entre el despacho de energía equitativo que, es la forma habitual de operación de

la Central Hidroeléctrica San Gabán II y, el despacho optimizado que se propone en ésta tesis.

Figura 11

Despacho de Energía con Reparto Equitativo de la Consigna de Generación

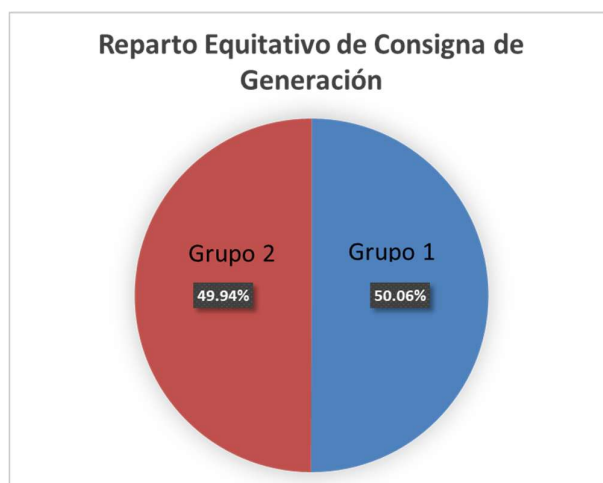
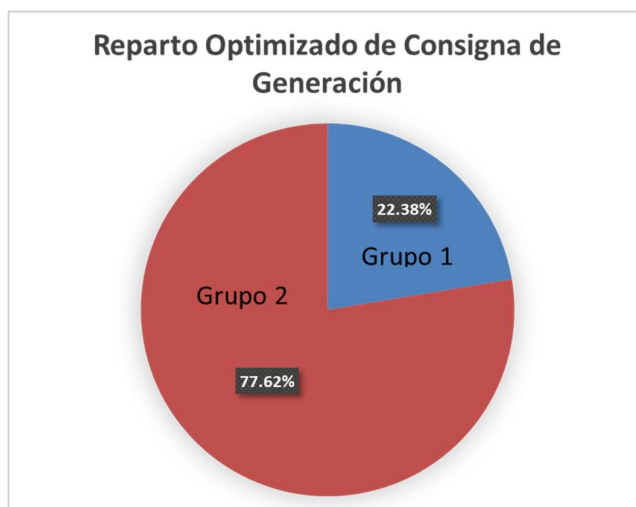


Figura 12

Despacho de Energía Optimizado con GAMS



Como se puede apreciar en la Figura 12; nuestro modelo de optimización del despacho de energía de los grupos generadores de la Central

Hidroeléctrica San Gabán II, propone un reparto de la consigna de generación, prioritariamente para el Grupo 2, con un 77.62% de la energía total generada, frente a un 22.38% para el Grupo 1.

Analicemos entonces, si el despacho optimizado con GAMS, generaría algún beneficio. Para ello, presentamos un resumen de las Tablas 6 y 8 que, corresponden a los datos reales de despacho y los datos optimizados con GAMS; teniendo en cuenta que, en ambos escenarios se está tomando como base el despacho ejecutado el 01 de noviembre del 2025.

Tabla 9

Cuadro Comparativo: Despacho Ejecutado Vs Despacho Optimizado

	Despacho Ejecutado	Despacho Optimizado
Energía Despachada por el Gr1	729.35 MWh (50.06%)	326.06 MWh (22.38%)
Energía Despachada por el Gr2	727.72 MWh (49.94%)	1131.01 MWh (77.62%)
Recurso Hídrico Utilizado	797796 m ³	750394 m ³

Como se puede apreciar en el cuadro anterior, la sumatoria de la energía generada por los Grupos 1 y 2, en ambos casos es exactamente la misma, la cual asciende a 1457.07 MWh; pero, en el caso del despacho optimizado, se observa una disminución en el recurso hídrico utilizado, para generar la misma cantidad de energía; para el día de análisis esta diferencia asciende a 47402 m³; es decir, nuestro modelo de despacho optimizado con GAMS utiliza menos agua, para generar igual cantidad de energía que el despacho equitativo que utiliza la CHSGII.

Ahora bien, esa diferencia de 47402 m³ se traduce en 92.04 MWh adicionales, que podemos generar haciendo uso del modelo de optimización propuesto; lo que, a su vez se traduce en un incremento de S/ 6,100.74 adicionales para la Empresa de Generación Eléctrica San Gabán S.A., solo para el día que se usó como ejemplo. Estos datos son plasmados en la Tabla 10.

Tabla 10*Despacho Optimizado con GAMS*

Recurso Hídrico Optimizado m3	Energía Adicional MWh	Ingreso Adicional S/
47402	92.04	6,100.74

4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para un análisis riguroso, se realizó la simulación de todo un mes, del periodo de estiaje; para ello, se eligió un mes típico de generación, donde no se hayan realizado muchas paradas fortuitas o programadas de las unidades de generación; es por ello, que se eligió el mes de junio del 2025.

4.2.1. Incremento en la Generación de Energía

Siguiendo los pasos utilizados en la sección anterior, se analizaron los datos diarios de despacho de energía, datos reales que fueron extraídos del sistema de reportes del SCADA Symphony+ de la Central Hidroeléctrica San Gabán II; con estos datos, se simulaban escenarios de optimización y, el resultado fue que en todos y cada uno de los 30 días

del mes de junio, se obtuvo un incremento en la generación de energía.

En la Tabla 11, se presentan la energía despachada por la Central Hidroeléctrica San Gabán II y los datos que se obtuvieron con el modelo en GAMS que, corresponderían al despacho optimizado.

Tabla 11

Despacho Ejecutado Vs Despacho Optimizado

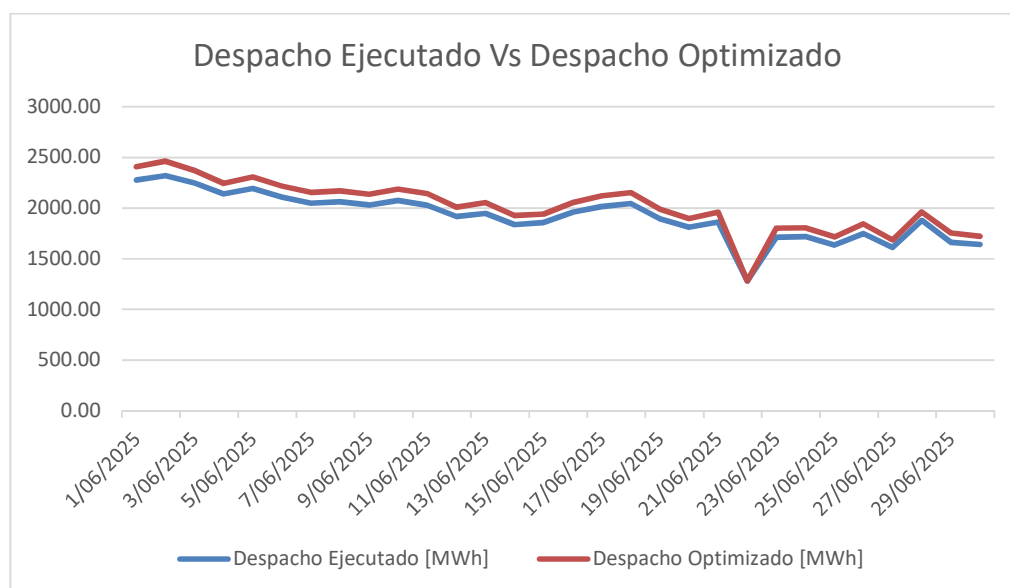
Fecha	Despacho Ejecutado [MWh]	Despacho Optimizado [MWh]
1/06/2025	2276.97	2408.01
2/06/2025	2320.11	2462.66
3/06/2025	2245.20	2370.58
4/06/2025	2140.65	2243.70
5/06/2025	2194.18	2307.01
6/06/2025	2108.28	2218.26
7/06/2025	2048.77	2155.38
8/06/2025	2061.39	2169.55
9/06/2025	2029.64	2137.28
10/06/2025	2073.15	2186.77
11/06/2025	2028.23	2143.60
12/06/2025	1916.39	2010.33
13/06/2025	1946.51	2052.48
14/06/2025	1838.26	1925.89
15/06/2025	1856.65	1939.59
16/06/2025	1958.90	2054.21
17/06/2025	2016.51	2122.25
18/06/2025	2045.37	2151.53
19/06/2025	1892.82	1988.95
20/06/2025	1809.28	1897.58

Fecha	Despacho Ejecutado [MWh]	Despacho Optimizado [MWh]
21/06/2025	1860.29	1957.50
22/06/2025	1280.54	1280.54
23/06/2025	1712.30	1801.28
24/06/2025	1718.23	1804.85
25/06/2025	1636.51	1716.92
26/06/2025	1748.27	1841.92
27/06/2025	1610.87	1685.08
28/06/2025	1879.86	1961.36
29/06/2025	1663.21	1754.86
30/06/2025	1640.21	1720.60

En la Figura 13, se observa de manera gráfica la diferencia que existe al aplicar el modelo de optimización con GAMS.

Figura 13

Comparación de Generación de Energía Ejecutada y Optimizada



4.2.2. Incremento en los Ingresos por Venta de Energía

Como se pudo apreciar en la Tabla 12, al aplicar el modelo de despacho optimizado con GAMS, a la generación de energía de la Central Hidroeléctrica San Gabán II, se produce un incremento en la producción de energía; ello por el uso, del recurso hídrico optimizado que, como vimos anteriormente es la diferencia que existe entre el agua utilizada en un escenario de despacho equitativo y uno de despacho optimizado.

Los resultados del ingreso adicional por venta de energía, que se obtendría al utilizar el modelo de optimización con GAMS propuesto en la presente tesis, son presentados en la Tabla 12.

Tabla 12

Ingresos Adicionales por Despacho Optimizado

Fecha	Recurso Hídrico Optimizado	Generación Adicional	Ingreso Adicional
	[m3]	[MWh]	[S/.]
1/06/2025	72967.82	131.04	12,550.74
2/06/2025	79610.76	142.55	17,487.51
3/06/2025	69681.20	125.38	14,994.55
4/06/2025	56966.90	103.05	12,438.76
5/06/2025	62552.71	112.82	11,116.06
6/06/2025	60781.40	109.98	9,877.45
7/06/2025	58753.55	106.62	9,591.19
8/06/2025	59647.65	108.17	10,744.61
9/06/2025	59318.93	107.64	9,951.88
10/06/2025	62696.44	113.62	14,204.94
11/06/2025	63564.62	115.37	13,035.53
12/06/2025	51418.18	93.93	9,047.81
13/06/2025	58147.54	105.97	10,507.02

Fecha	Recurso Hídrico Optimizado [m3]	Generación Adicional [MWh]	Ingreso Adicional [S/.]
14/06/2025	47747.74	87.63	8,394.29
15/06/2025	45213.90	82.94	7,804.51
16/06/2025	52251.20	95.31	8,425.90
17/06/2025	58169.51	105.74	9,779.22
18/06/2025	58453.00	106.16	8,974.92
19/06/2025	52568.30	96.13	9,223.48
20/06/2025	48037.70	88.29	10,261.45
21/06/2025	53072.81	97.21	10,585.74
22/06/2025	0.00	-	-
23/06/2025	48195.24	88.98	10,753.88
24/06/2025	46882.28	86.62	9,331.91
25/06/2025	43342.90	80.41	8,629.13
26/06/2025	50844.83	93.65	10,682.70
27/06/2025	39924.49	74.21	7,602.83
28/06/2025	44457.17	81.51	7,209.80
29/06/2025	49529.38	91.64	8,342.72
30/06/2025	43320.70	80.40	8,681.02
Total	1598118.87	2,913	300,231.52
Promedio	53270.63	97.10	10,008
Ingreso Estimado Mensual [S/]	300,232		
Ingreso Estimado Anual (Jun-Nov) [S/]	1,801,389		

Como se puede apreciar en la Tabla 12; de acuerdo con los datos obtenidos al aplicar nuestro modelo de optimización, se obtiene un incremento diario promedio de S/10,008.00; el mismo que se vería reflejado, para todo el periodo de estiaje sería de aproximadamente

S/1,801,389.00; obviamente, estos datos están sujetos a la disponibilidad de las unidades de generación y al costo marginal.

4.2.3. Aplicación del Modelo de Optimización en el Despacho de Energía

Como se vio en el desarrollo del presente capítulo, el modelo de optimización con GAMS, propuesto en la presente tesis; distribuye la consigna de generación de energía, de acuerdo con el rendimiento independiente de cada unidad de generación de la Central Hidroeléctrica San Gabán II y, conforme a los resultados obtenidos, se puede apreciar que se obtiene un mayor rendimiento, cuando se le asigna al Grupo 2 la mayor parte de la consigna de generación y, por lo tanto, el sistema obtiene su mayor rendimiento cuando la consigna de generación del Grupo 1 es mínima.

Para corroborar los datos teóricos con datos reales; se realizaron pruebas para diferentes consignas de generación asignadas por el COES y los datos obtenidos no hicieron otra cosa que, ratificar los resultados esperados de nuestro modelo de optimización del despacho de energía.

Los datos reales, obtenidos de los registros del SCADA Symphony+ se muestran en la Tabla 13.

Como se aprecia en la Tabla 13, para cada escenario de despacho de energía o consigna de generación dada por el COES; se obtiene que el mayor rendimiento total es cuando la generación del Grupo 2 está cerca de su potencia máxima o efectiva, en contraste con la consigna del Grupo

1 que, para obtener el máximo rendimiento del sistema, debe estar cerca a la potencia mínima de operación.

Tabla 13

Pruebas Reales del Modelo de Optimización con GAMS

CONSIGNA COES	Cons. G1	Gen. G1	Qturb. G1	Rend. G1	Cons. G2	Gen. G2	Qturb. G2	Rend. G2	Gen.Tot.	Qtot	Rend.Tot.
40	30	30.21	4.42	6.84	10	10.20	1.61	6.34	40.41	6.03	13.18
	25	25.54	3.66	6.99	15	15.56	2.45	6.35	41.09	6.10	13.34
	20	20.58	2.83	7.27	20	20.56	3.16	6.51	41.14	5.99	13.78
	15	15.41	1.96	7.85	25	25.32	3.87	6.55	40.73	5.83	14.40
	10	10.45	1.17	8.95	30	30.44	4.63	6.57	40.90	5.80	15.52
60	50	50.20	7.78	6.45	10	10.21	1.68	6.07	60.41	9.46	12.53
	45	45.45	6.98	6.51	15	15.41	2.46	6.26	60.86	9.45	12.76
	40	40.63	6.16	6.59	20	20.55	3.19	6.45	61.19	9.35	13.04
	35	35.17	5.24	6.71	25	25.15	3.88	6.49	60.32	9.12	13.20
	30	30.40	4.49	6.78	30	30.32	4.65	6.52	60.73	9.14	13.30
	25	25.03	3.61	6.94	35	35.00	5.34	6.55	60.03	8.95	13.49
	20	20.48	2.85	7.18	40	40.44	6.11	6.62	60.91	8.96	13.80
	15	15.30	1.95	7.86	45	45.24	6.93	6.53	60.54	8.87	14.39
	10	10.32	1.17	8.84	50	50.26	7.71	6.52	60.57	8.88	15.36
70	55	55.18	8.69	6.35	15	15.15	2.57	5.91	70.33	11.25	12.26
	50	50.13	7.81	6.42	20	20.03	3.15	6.37	70.16	10.95	12.79
	45	45.24	6.98	6.48	25	25.14	3.91	6.42	70.37	10.90	12.90
	40	40.36	6.14	6.57	30	30.30	4.70	6.44	70.66	10.85	13.01
	35	35.39	5.28	6.70	35	35.35	5.41	6.54	70.74	10.69	13.24
	30	30.11	4.46	6.76	40	40.05	6.08	6.58	70.16	10.54	13.34
	25	25.51	3.70	6.89	45	45.50	7.01	6.49	71.01	10.71	13.38
	20	20.05	2.80	7.16	50	50.01	7.72	6.48	70.07	10.52	13.64
	15	15.24	1.95	7.83	55	55.21	8.57	6.44	70.44	10.52	14.27
80	55	55.54	8.79	6.32	25	25.43	3.99	6.38	80.97	12.78	12.69
	50	50.32	7.87	6.39	30	30.22	4.68	6.45	80.54	12.55	12.85
	45	45.17	7.00	6.45	35	35.02	5.39	6.49	80.19	12.39	12.95
	40	40.08	6.12	6.55	40	40.03	6.10	6.56	80.11	12.22	13.11
	35	35.20	5.31	6.63	45	45.18	6.99	6.47	80.39	12.29	13.10
	30	30.20	4.50	6.70	50	50.11	7.76	6.46	80.31	12.27	13.16
	25	25.18	3.67	6.86	55	55.13	8.60	6.41	80.31	12.27	13.27
90	55	55.27	8.77	6.30	35	35.16	5.44	6.46	90.43	14.21	12.76
	50	50.33	7.92	6.36	40	40.25	6.20	6.49	90.58	14.11	12.85
	45	45.58	7.08	6.44	45	45.51	7.06	6.45	91.10	14.14	12.88
	40	40.17	6.18	6.51	50	50.09	7.78	6.44	90.26	13.96	12.94
	35	35.01	5.28	6.62	55	54.97	8.59	6.40	89.97	13.88	13.02

4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la presente investigación evidencian que la aplicación de un modelo de optimización del despacho de energía, implementado en GAMS, permite mejorar significativamente el



aprovechamiento del recurso hídrico en la CHSGII durante los meses de estiaje. En condiciones reales de operación, se logró optimizar, en promedio, 53270.63 m³ de agua de manera diaria, lo que se tradujo en un incremento aproximado del 5% en la producción mensual de energía, así como en un beneficio económico adicional de hasta S/ 1,801,389.00 mensuales.

Al comparar estos resultados con los obtenidos por (Aracayo Mendoza, 2019); en su tesis de maestría "Modelo de Optimización del Despacho en Estiaje de una Central Hidroeléctrica con Embalse de Regulación para el Mercado de Corto Plazo Mediante Programación No Lineal Entera Mixta", afirma que al aplicar el modelo desarrollado en su tesis, a la CHSGII, se obtuvo un incremento de producción de hasta 10.3%; es cual, en mi opinión, es completamente factible, siempre cuando consideremos un escenario ideal, relajando las restricciones de nuestro sistema; sin embargo, en un escenario de operación real, debemos ser más moderados con nuestros resultados.

En primer lugar, el modelo desarrollado en la presente investigación considera restricciones operativas reales, tales como límites de caudal por turbina, condiciones de operación de los grupos generadores, entre otras. Estas restricciones reducen el grado de libertad del modelo y, por ende, limitan el incremento máximo de generación alcanzable.

En segundo lugar, la operación en condiciones reales está sujeta a variabilidad hidrológica y requerimientos del sistema eléctrico, tales como cambios en la demanda, coordinación con el despacho del sistema



interconectado y restricciones impuestas por el operador del sistema. Estos factores no siempre son considerados en modelos teóricos, los cuales suelen asumir condiciones ideales o simplificadas.

Asimismo, es probable que el estudio de (Aracayo Mendoza, 2019), se base en supuestos más simplificados o en escenarios óptimos ideales, donde las curvas de eficiencia, la disponibilidad de caudal y la operación de los grupos generadores se consideran sin limitaciones prácticas, lo que permite alcanzar incrementos mayores en la producción de energía.

A pesar de ello, el incremento del 5% obtenido en esta investigación resulta altamente significativo, dado que ha sido validado bajo condiciones reales de operación, lo que le otorga un mayor grado de aplicabilidad práctica. Además, el beneficio económico asociado demuestra que incluso mejoras moderadas en la eficiencia del despacho pueden generar impactos económicos relevantes en la operación de la central.

En este sentido, los resultados obtenidos no contradicen los hallazgos de (Aracayo Mendoza, 2019), sino que los complementan, evidenciando que el potencial máximo de optimización puede verse limitado por condiciones reales de operación. Por tanto, el valor del 10.3% puede interpretarse como un límite superior teórico, mientras que el 5% obtenido en este estudio representa un resultado alcanzable y sostenible en la práctica.

Finalmente, la diferencia entre ambos resultados resalta la importancia de desarrollar modelos que no solo sean óptimos desde el punto de vista matemático, sino también viables operativamente, integrando las restricciones reales del sistema eléctrico y de la central hidroeléctrica.

CONCLUSIONES

PRIMERA. – Se logró desarrollar e implementar un modelo de optimización del despacho de energía de los grupos de generación de la central hidroeléctrica San Gabán II, haciendo uso del software GAMS, permitiendo una gestión más eficiente del recurso hídrico disponible durante los meses de estiaje, cumpliendo con las restricciones hidráulicas y operativas del sistema.

SEGUNDA. - La aplicación del modelo de optimización permitió un mejor aprovechamiento del recurso hídrico, de acuerdo a las pruebas realizadas, se pudo evidenciar una optimización de hasta 53270.63 m³ de agua, lo que demuestra la existencia de ineficiencias en el esquema de despacho convencional y la viabilidad de su mejora mediante herramientas de optimización matemática como el software GAMS.

TERCERA. - Se realizó el análisis de cada día del mes de junio del año 2025 y se determinó que, aplicando el modelo de optimización con GAMS propuesto, es posible conseguir una generación adicional de 2913 MWh mensuales que, representa un incremento de aproximadamente 5% de la producción total del mes de junio; validando la hipótesis de que una adecuada asignación de consignas de generación mejora significativamente el desempeño energético de la CHSGII.

CUARTA. - En concordancia con la conclusión anterior, un incremento en la generación de energía se traduce en un beneficio económico adicional de hasta S/ 1,801,389.00 al año; lo cual evidencia que la implementación del modelo no solo mejora la eficiencia técnica, sino que también aporta un impacto económico significativo para la operación de la CHSGII.

RECOMENDACIONES

PRIMERA. - Implementar de manera permanente el modelo de optimización desarrollado en el software GAMS como herramienta de apoyo en la toma de decisiones operativas de la CHSGII, especialmente durante los periodos de estiaje.

SEGUNDA. – Integrar el modelo de optimización con los sistemas de operación y planificación existentes, considerando la actualización continua de datos hidrológicos, costos marginales y condiciones del sistema eléctrico, con el fin de mantener la precisión y confiabilidad de los resultados.

TERCERA. - Se recomienda evaluar el impacto de aplicar el modelo optimizado de despacho de energía; ya que, el resultado de la optimización es que la mayor cantidad de energía generada por el sistema, recae en el Grupo 2 de la CHSGII; lo que conllevará un mayor desgaste de componentes, como el rodete, deflectores y agujas de los inyectores; conllevando ello a incrementar las horas de parada por mantenimiento o cambio de componentes.

CUARTA. – Evaluar la aplicación de metodologías similares en otras centrales hidroeléctricas del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), con el objetivo de optimizar el uso del recurso hídrico a nivel sistémico y maximizar los beneficios energéticos y económicos del sector eléctrico.



BIBLIOGRAFÍA

- Aracayo Mendoza, J. (2019). *Modelo de Optimización del Despacho en Estiaje de una Central Hidroeléctrica con Embalse de Regulación para el Mercado de Corto Plazo Mediante Programación no Lineal Entera Mixta*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Biggar, D. R., y Hesamzadeh, M. R. (2014). The economics of electricity markets. En *The Economics of Electricity Markets* (Vol. 9781118775). Wiley-IEEE Press. <https://doi.org/10.1002/9781118775745>
- Breeze, P. (2018). Hydropower. En *Hydropower*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03622-7>
- Chawwa, T. (2013). *Introduction to GAMS (General Algebraic Modeling System)*. 29.
- Glosario de abreviaturas y definiciones utilizadas en los procedimientos técnicos del COES - SINAC, 300 (2001).
- COES - SINAC. (2025). *Informe de la operación anual del SEIN 2024*.
- COES SINAC. (2016). *Informe de prueba de potencia efectiva de la central hidroeléctrica San Gabán II*.
- COES SINAC. (2021). *Informe Técnico de Ensayo de la Potencia Mínima de la C.H. San Gabán*.
- Cuenta Luque, L. W. (2017). *Diseño y Simulación de un Sistema Energético*



Fotovoltaico con Control de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia para Proveer Energía Eléctrica Eficiente en la Región de Puno. Universidad Nacional del Altiplano.

Díaz Serna, F. J. (2011). • *Optimización de la Operación y Evaluación de la Eficiencia Técnica de una Empresa de Generación Hidroeléctrica en Mercados de Corto Plazo.*

Fano, J. M. M. (2006). La generación de energía hidroeléctrica. *Anales de mecánica y electricidad*, 83(1), 35–40.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1448362>

García-Guarín, P. J., Cantor-López, J., Cortés-Guerrero, C., Guzmán-Pardo, M. A., y Rivera, S. (2019). Implementación del algoritmo VNS-DEEPSO para el despacho de energía en redes distribuidas inteligentes. *INGE CUC*, 15(1).
<https://doi.org/10.17981/ingecuc.15.1.2019.13>

Hajjamoosha, P., Rastgou, A., Bahramara, S., y Bagher Sadati, S. M. (2021). Stochastic energy management in a renewable energy-based microgrid considering demand response program. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 129, 106791.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106791>

Kumar, K., y Saini, R. P. (2022). A review on operation and maintenance of hydropower plants. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101704. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101704>



Ledesma Guatarilla, M. V. (2017). *Optimizando del despacho de energía en sistema eléctrico de potencia usando GAMS*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO.

Li, C., Lin, T., y Xu, Z. (2021). Impact of hydropower on air pollution and economic growth in China. *Energies*, 14(10), 2812.
<https://doi.org/10.3390/en14102812>

Liu, W., Xu, H., Wang, X., Zhang, S., y Hu, T. (2022). Optimal dispatch strategy of virtual power plants using potential game theory. *Energy Reports*, 8, 1069–1079. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.08.148>

Mamani Montesinos, C. M., y Ramos Velez, F. W. (2018). • *Optimización Energética del Generador de Vapor (Caldera) del Comedor Universitario de la Universidad Nacional Del Altiplano de Puno con Capacidad de 150 Kg de Vapor/Hora*. Universidad Nacional del Altiplano.

Mar, J. I. (2000). *Introducción al lenguaje GAMS*. 1–28.

Ley de concesiones eléctricas, 41 (1992).

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN). (2011). Fundamentos técnicos y económicos del sector eléctrico peruano. En *Fundamentos técnicos y económicos del sector eléctrico peruano*. OSINERGMIN.

Orille Fernández, Á. L. (1997). Centrales eléctricas I. En *Centre de Publicacions del Campus Nord* (Vol. 1).



Osinerghmin. (2017). *La industria de la electricidad en el Perú: 25 años de aportes al crecimiento económico del país* (1a ed.). OSINERGMIN.

Pérez Mora, S. R. (2015). Optimización del despacho hidrotérmico en el corto plazo basado en el modelo programación lineal entera mixta. En *Tesis*.

Ramos, A., Sánchez, P., Ferrer, J. M., Barquín, J., y Linares, P. (2010). Modelos matematicos de optimizacion. En *Universidad Pontificia Comillas*.

Rau Vargas, R. (2010). *Despacho economico óptimo de plantas de generación hidrotérmico en sistemas de energía eléctrica*.
<http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3604/RauVargas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Romero, I. (2017). *Flujos óptimos de potencia reactiva basado en óptimo despacho de carga usando Gams*. Universidad Politécnica Salesiana - Ecuador.

Soroudi, A. (2019). *Power system optimization modeling in GAMS*. Springer.

Sucari Chávez, J. (2023). *Diseño de un sistema de supervisión de la generación de energía eólica en los distritos de Puno y Juliaca basado en el modelo de internet de las cosas - 2023*. Universidad Nacional de Altiplano.

Tarapuez, J., y Barrera, G. (2010). GAMS aplicado a las ciencias económicas. En *Universidad Nacional de Colombia*.
[http://www.fce.unal.edu.co/uifce/proyectos-de-estudio/pdf/GAMS aplicado a las Ciencias Economicas](http://www.fce.unal.edu.co/uifce/proyectos-de-estudio/pdf/GAMS%20aplicado%20a%20las%20Ciencias%20Economicas)



Trujillo Arana, S. E. (2021). *Optimización de la Generación en la C.H. Cerro del Águila Mediante el Uso de Curvas de Eficiencia de sus Unidades Generadoras*. Universidad Nacional de Ingeniería.

Tseng, C. J., Dwijendra, N. K. A., Opuencia, M. J. C., Ganieva, S., y Muda, I. (2022). Optimal energy management in a smart micro grid with demand side participation. *Environmental and Climate Technologies*, 26(1), 228–239. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2022-0018>

Vallejo Correa, P., y Barrera Singaña, C. (2022). Estado del arte de despacho económico hidro-térmico-eólico utilizando técnicas heurísticas. *International Journal of Interdisciplinary Studies*, 3, 762–773. <https://doi.org/https://doi.org/10.51798/sijis.v3i2.378>

Zakariazadeh, A., Jadid, S., y Siano, P. (2014). Smart microgrid energy and reserve scheduling with demand response using stochastic optimization. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 63, 523–533. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.037>



ANEXOS

ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

MATRIZ DE CONSISTENCIA
OPTIMIZACIÓN CON GAMS DEL DESPACHO DE ENERGÍA DE LOS GRUPOS GENERADORES DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II DURANTE LOS MESES DE ESTIAJE
Autor: Roger Amilcar Montes de Oca Paredes

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA	POBLACIÓN Y MUESTRA
Problema General ¿Cómo optimizar el despacho de energía de los grupos de generación de la central hidroeléctrica San Gabán II, para un mejor aprovechamiento del recurso hídrico disponible durante los meses de estiaje? Problemas Específicos P.E. 1: ¿Cómo modelar y optimizar el despacho de energía de los grupos de generación de la central hidroeléctrica San Gabán II, durante los meses de estiaje, haciendo uso del software GAMS? P.E. 2: ¿En cuánto se puede incrementar la producción de energía de la central hidroeléctrica San Gabán II, haciendo uso del modelo de optimización hallado con el software GAMS? P.E. 3: ¿Cuál será el beneficio económico de aplicar el modelo de optimización hallado con software GAMS, al despacho de energía de los grupos de generación de la central hidroeléctrica San Gabán II?	Objetivo General: Optimizar el despacho de energía de los grupos de generación de la central hidroeléctrica San Gabán II, para un mejor aprovechamiento del recurso hídrico disponible durante los meses de estiaje. Objetivos Específicos: O.E. 1: Modelar y optimizar, usando el software GAMS, el despacho de energía de los grupos de generación de la central hidroeléctrica San Gabán II, para un mejor uso del recurso hídrico disponible, durante los meses de estiaje. O.E. 2: Determinar en cuánto se incrementa la producción de energía de la central hidroeléctrica San Gabán II, al aplicar el modelo de despacho de energía hallado con el software GAMS. O.E. 3: Determinar el beneficio económico que representará el poner en práctica el modelo de optimización, hallado con el software GAMS, del despacho de energía de los grupos de generación de la central hidroeléctrica San Gabán II.	Hipótesis General La optimización del despacho de energía de los grupos generadores de la central hidroeléctrica San Gabán II, nos permitirá un mejor aprovechamiento del recurso hídrico disponible durante los meses de estiaje. Hipótesis Específicas H.E. 1: Haciendo uso del software de modelamiento GAMS, se puede hallar un modelo de despacho de energía óptimo, para los grupos generadores de la central hidroeléctrica San Gabán II, que permita un mejor aprovechamiento del recurso hídrico disponible durante los meses de estiaje. H.E. 2: Al aplicar el modelo de optimización, hallado con el software GAMS, se incrementará la producción de energía eléctrica de los grupos generadores de la central hidroeléctrica San Gabán II. H.E. 3: Al aplicar el modelo de optimización, hallado con el software GAMS, se incrementará el beneficio económico, por venta de energía, de la Empresa de Generación Eléctrica San Gabán II.	Variables Independientes - Optimización del Despacho de Energía mediante GAMS: Aplicación de técnicas de optimización matemática, para la mejor asignación de las consignas de generación de los grupos generadores de la CHSGII. Variables Dependientes - Producción de Energía: Cantidad de energía generada por los grupos hidroeléctricos de la CHSGII. - Aprovechamiento del Recurso Hídrico: Eficiencia en el uso del agua disponible para generación de energía, durante los meses de estiaje. - Beneficio Económico: Ganancia adicional para la EGESGSA, por venta de energía, producto del uso eficiente del recurso hídrico disponible durante los meses de estiaje.	Método: El método usado es la PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA DETERMINÍSTICA. Nivel: El nivel de la investigación es EXPLICATIVO. Tipo de Investigación: El tipo de investigación usado es la INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA APLICADA. Enfoque de la Investigación: Se usa un enfoque CUANTITATIVO. Diseño de la Investigación: Se usó un diseño NO EXPERIMENTAL de tipo LONGITUDINAL. Además, se puede precisar como DESCRIPTIVO CORRELACIONAL y EXPLICATIVO.	Población: Para efectos del presente proyecto de investigación, se considerará como nuestra población a todas las centrales hidroeléctricas que aportan energía a nuestro sistema interconectado nacional. Muestra: La muestra que se está considerando, para el desarrollo del proyecto de investigación, son los grupos generadores de la central hidroeléctrica San Gabán II.

ANEXO 2: INFORME DE POTENCIA EFECTIVA DE LA CHSGII



San Isidro, 09 de febrero del 2016

COES/D-068-2016

Señor
Gustavo Gárnica Salinas
Gerente General
EMPRESA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA SAN GABÁN S.A.
Presente

Asunto : INFORME DE PRUEBA DE POTENCIA EFECTIVA DE LA CENTRAL
HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II

Ref. : Carta EGESG-061-2016-GG recibida el 29.01.2016

De mi consideración :

Me dirijo a usted en atención a la comunicación de la referencia, mediante la cual nos hace llegar el levantamiento de las observaciones efectuado al informe técnico "Estudio de Determinación de la Potencia Efectiva de la Central Hidroeléctrica San Gabán II".

Al respecto, le manifestamos que luego de efectuar la revisión de la información presentada, se ha elaborado el Informe Técnico N° COES/D/DP/SGI-019-2016 que se adjunta, habiéndose verificado que se ha cumplido con los requisitos establecidos en el Procedimiento N° 18 "Determinación de la Potencia Efectiva de las Centrales Hidroeléctricas".

Por consiguiente, el Informe de Prueba de Potencia Efectiva de la Central Hidroeléctrica San Gabán II ha sido aprobado y sus resultados que se muestra en el Cuadro N° 1 adjunto, son válidos a partir de la fecha.

Sin otro particular, hago propicia la ocasión para saludarlo.

Atentamente,

Ing. JAIME GUERRA MONTES DE OCA
DIRECTOR EJECUTIVO (a)
COES

Adj.: Lo indicado.
JG / TM
C.c.: DO, SPR, SCO, SEV, STR, SPL, SGI.

Manuel Rosad y Paz Soldán N° 364
San Isidro, Lima - Perú
Telf.: (51-1) 611-8585 - Fax: (51-1) 705-3076
www.coes.org.pe



Cuadro N° 1

CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II

Unidad	Potencia Efectiva (kW)	Caudal Turbinado (m ³ /s)	Potencia Auxiliares (kW)
Grupo N° 01	58 187	10,07	254,62
Grupo N° 02	57 541	9,81	116,80
Total	115 728	19,88	371,42



 COMITÉ DE OPERACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL	APROBACIÓN INFORME DE EPE DE LA CH SAN GABÁN II	SUBDIRECCIÓN GESTIÓN DE INFORMACIÓN INFORME N° COES/D/SIGI-019-2016 Fecha: 08 de febrero del 2016
---	---	--

APROBACIÓN DEL INFORME DE LA MEDICIÓN DE LA POTENCIA EFECTIVA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II

1. ANTECEDENTES

- 1.1. La empresa SAN GABÁN cursó la carta EGESG-613-2015-GG al COES recibida el 30.09.2015, mediante la cual informa que tiene previsto las pruebas de Potencia Efectiva de la Central Hidroeléctrica San Gabán II para el día 27.10.15; indicando que el ensayo sería efectuado por la empresa HAMEK y solicita se designe un Veedor.
- 1.2. Mediante la comunicación COES/D/DP-1598-2015 del 05.10.15 el COES solicita la información requerida para programar el ensayo, de acuerdo a los numerales 7.1.1 y 7.1.2 del Procedimiento Técnico N°18 "Determinación de la Potencia Efectiva de las Centrales Hidroeléctricas".
- 1.3. Con carta EGESG-673-2015-GG de fecha 26.10.2015, SAN GABÁN remite al COES la información solicitada de acuerdo a los numerales 7.1.1 y 7.1.2 del Procedimiento Técnico N°18 "Determinación de la Potencia Efectiva de las Centrales Hidroeléctricas". Asimismo solicita la programación del Ensayo de Potencia efectiva para el 30.10.15.
- 1.4. Mediante Carta COES/D/DP-1752-2015 del 29.10.15, el COES solicita a San Gabán, ingrese en el Programa Semanal de Operación (PSO) la solicitud de dicho ensayo, tal como lo establece el Procedimiento Técnico N° 1 "Programación de la Operación de Corto Plazo", para luego proceder con la designación del Veedor.
- 1.5. SAN GABÁN con carta EGESG-709-2015-GG recibida el 12.11.2015, solicita al COES la programación y designación del veedor para el 04.12.15, debido que para esa fecha fue incluido el EPE en el Programa Semanal de Operación.
- 1.6. Mediante la comunicación COES/D/DP-1912-2015 del 25.11.15 el COES confirmó la fecha del EPE para el 04.12.15, designando como veedor al Ing. Carlos Herrera Leveratto.
- 1.7. La empresa SAN GABÁN realizó el ensayo de medición de la Potencia Efectiva de la Central Hidroeléctrica San Gabán II el día 04 de diciembre del 2015.
- 1.8. Con carta EGESG-829-2015-GG recibida el 04.01.2016, SAN GABÁN remite al COES el informe técnico del ensayo de medición de potencia efectiva de la Central Hidroeléctrica San Gabán II.
- 1.9. Mediante la comunicación COES/D/DP-096-2016 del 19.01.16 el COES remite a SAN GABÁN las observaciones encontradas en el Informe técnico del ensayo de medición de potencia efectiva de la Central Hidroeléctrica San Gabán II



 COMITÉ DE OPERACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL	APROBACIÓN INFORME DE EPE DE LA CH SAN GABÁN II	SUBDIRECCIÓN GESTIÓN DE INFORMACIÓN INFORME N° COES/D/SGI-019-2016
		Fecha: 08 de febrero del 2016

1.10. Con carta EGESG-061-2016-GG recibida el 29.01.2016, SAN GABÁN remite al COES el levantamiento de las observaciones del informe técnico del ensayo de medición de potencia efectiva de la Central Hidroeléctrica San Gabán II.

2. OBJETIVO

Revisar el informe presentado por la empresa SAN GABÁN con la finalidad de verificar el cumplimiento de requisitos establecidos en el Procedimiento N° 18 "Determinación de la Potencia Efectiva de las Centrales Hidroeléctricas", efectuado a la Central Hidroeléctrica San Gabán II.

3. BASE LEGAL

- 3.1. Decreto Ley N° 25844.- Ley de Concesiones Eléctricas.
- 3.2. Decreto Supremo N° 009-93-EM.- Reglamento de la Ley de Concesiones Eléctricas.
- 3.3. Procedimiento Técnico del COES N° 18 "Determinación de la Potencia Efectiva de las Centrales Hidroeléctricas".

4. DOCUMENTOS PRESENTADOS

- 4.1 Carta EGESG-829-2015-GG de SAN GABÁN, en la cual adjunta el Informe del "Estudio de Determinación de la Potencia Efectiva de la Central Hidroeléctrica San Gabán II", con los cálculos de sustento en medio físico y magnético.
- 4.2 Carta EGESG-061-2016-GG de SAN GABÁN, en la cual adjunta el levantamiento de observaciones del Informe técnico del "Estudio de Determinación de la Potencia Efectiva de la Central Hidroeléctrica San Gabán II", con los cálculos de sustento en medio físico y magnético.

5. REVISIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN PRESENTADA

- 5.1. Se comprobó que las mediciones de potencia se efectuaron con instrumentos confiables y calibrados. Para ese fin adjuntaron los certificados de contrastación respectivos de acuerdo al rango de precisión de clase 0,2. A continuación se muestra el Cuadro N° 1 con un resumen de los equipos de medición utilizados.



	APROBACIÓN INFORME DE EPE DE LA CH SAN GABÁN II	SUBDIRECCIÓN GESTIÓN DE INFORMACIÓN INFORME N° COES/D/SOI-019-2016 Fecha: 08 de febrero del 2016
---	--	---

Cuadro N° 1
Equipos de Medición Utilizados en el Ensayo de Potencia Efectiva de la Central
Hidroeléctrica San Gabán II.

Variables Medidas	Ubicación	Equipo de Medición	Característica	Certificado de Calibración
Potencia	Bornes de Generación Grupo 1	Analizador de redes electrónico de potencia y energía, marca METREL, modelo MI 2892, serie 13420495	Portátil	Vigente
	Bornes de Generación Grupo 2	Analizador de redes electrónico de potencia y energía, marca A-EBERLE, modelo PQ BOX 100, serie 1530-117	Portátil	Vigente
	Servicios Auxiliares Grupo 1	Analizador de redes electrónico de potencia y energía, marca METREL, modelo MI 2792, serie 12190652	Portátil	Vigente
	Servicios Auxiliares Grupo 2	Analizador de redes electrónico de potencia y energía, marca LUTRON, modelo DW-6092, serie B1211270	Portátil	Vigente
Presión	Tubería forzada Grupo 1 (Ingreso de válvula esférica)	Transductor de presión marca WIKA S-10/1104QQ40	Portátil	Vigente
	Tubería forzada Grupo 2 (Ingreso de válvula esférica)	Transductor de presión marca WIKA S-10/1104N0FJ	Portátil	Vigente
Nivel	Embalse horario	Sensor de nivel marca ACUAREAD modelo 10M ABS, serie 13074031	Portátil	Vigente
Temperatura	Cojinetes de turbina y devanado del generador	Sensor de temperatura por medio de resistencia	Fijo	No se puede contrastar



5.2. Se evidenció la medición en simultáneo de la potencia en bornes de los generadores, la potencia consumida por los servicios auxiliares, la altura bruta, temperaturas, factor de potencia, las presiones de ingreso de los grupos de la central hidroeléctrica San Gabán II. Asimismo se constató que la duración del ensayo fue de cinco (5) horas, desde las 8:15 horas hasta las 13:15 horas.

 COMITÉ DE OPERACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL	APROBACIÓN INFORME DE EPE DE LA CH SAN GABÁN II	SUBDIRECCION GESTION DE INFORMACION INFORME N° COES/D/SGI-019-2016 Fecha: 08 de febrero del 2016
--	--	--

- 5.3. Se verificó que los registros de la potencia activa medida no excediera del $\pm 1.5\%$ respecto del promedio de los datos registrados.

Hora	CH SAN GABÁN II			
	Grupo 1		Grupo 2	
	Potencia (MW)	Variabilidad (%)	Potencia (MW)	Variabilidad (%)
08:30	58,338	0,260%	57,466	-0,131%
08:45	58,371	0,317%	57,587	0,079%
09:00	58,392	0,353%	57,601	0,103%
09:15	58,383	0,338%	57,592	0,087%
09:30	58,395	0,359%	57,600	0,101%
09:45	58,387	0,345%	57,594	0,091%
10:00	58,383	0,337%	57,605	0,110%
10:15	58,347	0,275%	57,635	0,162%
10:30	58,376	0,326%	57,623	0,142%
10:45	58,414	0,391%	57,622	0,141%
11:00	58,137	-0,086%	57,557	0,026%
11:15	58,067	-0,206%	57,510	-0,055%
11:30	58,059	-0,219%	57,515	-0,046%
11:45	58,031	-0,267%	57,498	-0,075%
12:00	58,015	-0,294%	57,500	-0,073%
12:15	57,973	-0,367%	57,478	-0,111%
12:30	57,964	-0,383%	57,476	-0,114%
12:45	57,940	-0,424%	57,472	-0,121%
13:00	57,905	-0,485%	57,455	-0,150%
13:15	57,854	-0,572%	57,445	-0,167%
Promedio	58,187		57,541	

- 5.4. Potencia de servicios auxiliares

Hora	CH SAN GABÁN II	
	SERVICIOS AUXILIARES (kW)	
	Grupo 1	Grupo 2
08:30	248,70	117,30
08:45	257,40	116,80
09:00	250,30	116,70
09:15	256,60	116,60
09:30	247,30	118,10
09:45	256,80	119,70
10:00	248,40	116,60
10:15	255,30	115,70
10:30	254,20	115,90
10:45	258,70	115,70
11:00	256,40	115,50
11:15	256,30	114,50
11:30	249,20	117,10
11:45	262,60	115,80
12:00	250,00	115,70
12:15	261,30	121,00
12:30	251,40	117,30
12:45	261,40	118,10
13:00	248,10	115,80
13:15	262,00	116,00
Promedio	254,62	116,80





 COES SINAC COMITÉ DE OPERACIÓN ECONOMICA DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL	APROBACIÓN INFORME DE EPE DE LA CH SAN GABÁN II	SUBDIRECCION GESTION DE INFORMACION INFORME N° COES/D/SGI-019-2016 Fecha: 08 de febrero del 2016
--	--	---

- 5.5. Se verificó que los registros de la altura bruta no excediera del $\pm 1,0\%$ respecto del promedio de los datos registrados.

Hora	Nivel Medido (m)	CH SAN GABÁN II		
		Nivel de Agua Embalse (masem)	Altura Bruta (HB) (m)	Variabilidad Altura Bruta (%)
08:30	3,03	2095,10	679,10	0,0526%
08:45	3,02	2095,09	679,09	0,0516%
09:00	2,96	2095,03	679,03	0,0434%
09:15	2,90	2094,97	678,97	0,0338%
09:30	2,86	2094,93	678,93	0,0276%
09:45	2,83	2094,90	678,90	0,0244%
10:00	2,78	2094,85	678,85	0,0168%
10:15	2,76	2094,83	678,83	0,0136%
10:30	2,71	2094,78	678,78	0,0065%
10:45	2,69	2094,76	678,76	0,0036%
11:00	2,64	2094,71	678,71	-0,0045%
11:15	2,61	2094,69	678,69	-0,0078%
11:30	2,57	2094,64	678,64	-0,0139%
11:45	2,53	2094,61	678,61	-0,0195%
12:00	2,50	2094,57	678,57	-0,0250%
12:15	2,47	2094,55	678,55	-0,0284%
12:30	2,43	2094,50	678,50	-0,0358%
12:45	2,38	2094,45	678,45	-0,0431%
13:00	2,37	2094,44	678,44	-0,0443%
13:15	2,32	2094,39	678,39	-0,0517%
Promedio	2,67	2094,74	678,74	
Máximo		2095,10	679,10	0,0526%
Mínimo		2094,39	678,39	-0,0517%

- 5.6. Los registros de temperatura en los cojinetes del generador y en los devanados del estator presentaron valores en estado estacionario, lo que significa que las magnitudes a medir no variaron con el tiempo.

- 5.7. Se verificó que la fluctuación de los registros de velocidad de rotación no excediera del $\pm 0,5\%$, respecto al promedio de los datos registrados.

Hora	CH SAN GABÁN II			
	Grupo 1		Grupo 2	
	RPM	Variabilidad (%)	RPM	Variabilidad (%)
08:30	514,81	0,025%	514,81	0,025%
08:45	514,81	0,025%	514,81	0,025%
09:00	514,81	0,025%	514,81	0,025%
09:15	514,81	0,025%	514,81	0,025%
09:30	514,81	0,025%	514,81	0,025%
09:45	514,81	0,025%	514,81	0,025%
10:00	514,81	0,025%	514,81	0,025%
10:15	514,81	0,025%	514,81	0,025%
10:30	514,81	0,025%	514,81	0,025%
10:45	514,81	0,025%	514,81	0,025%
11:00	514,81	0,025%	514,81	0,025%
11:15	514,81	0,025%	514,81	0,025%
11:30	514,81	0,025%	514,81	0,025%
11:45	514,81	0,025%	514,81	0,025%
12:00	514,81	0,025%	514,81	0,025%
12:15	514,81	0,025%	514,81	0,025%
12:30	514,81	0,025%	514,81	0,025%
12:45	514,81	0,025%	514,81	0,025%
13:00	514,81	0,025%	514,81	0,025%
13:15	512,24	-0,475%	512,24	-0,475%
Promedio	514,69		514,69	



 COMITÉ DE OPERACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL	APROBACIÓN INFORME DE EPE DE LA CH SAN GABÁN II	SUBDIRECCION GESTION DE INFORMACION INFORME N° COES/D/SGI-019-2016 Fecha: 08 de febrero del 2016
--	--	--

- 5.8. Se verificó que el ensayo se efectuó operando con un factor de potencia comprendido en un rango definido por el valor promedio $\pm$ dos veces la desviación estándar. Dicho promedio debe determinarse considerando los valores de factor de potencia registrados en las horas punta, para el período de diciembre a marzo anterior a la fecha de los ensayos.

Hora	CH SAN GABÁN II			
	Grupo 1		Grupo 2	
	F.P.	Variabilidad (%)	F.P.	Variabilidad (%)
08:30	0.998	0.025%	0.993	-0.180%
08:45	0.998	0.025%	0.992	-0.267%
09:00	0.999	0.125%	0.991	-0.361%
09:15	0.999	0.125%	0.991	-0.381%
09:30	0.999	0.125%	0.991	-0.408%
09:45	0.999	0.125%	0.991	-0.408%
10:00	0.999	0.125%	0.991	-0.408%
10:15	0.999	0.125%	0.991	-0.361%
10:30	0.999	0.125%	0.991	-0.381%
10:45	0.999	0.125%	0.991	-0.381%
11:00	0.997	-0.075%	0.996	0.108%
11:15	0.996	-0.175%	0.995	0.323%
11:30	0.996	-0.175%	0.995	0.323%
11:45	0.996	-0.175%	0.995	0.323%
12:00	0.997	-0.075%	0.995	0.343%
12:15	0.997	-0.075%	0.999	0.423%
12:30	0.997	-0.075%	0.999	0.423%
12:45	0.997	-0.075%	0.999	0.423%
13:00	0.997	-0.075%	0.999	0.423%
13:15	0.997	-0.075%	0.999	0.423%
Promedio	0.998		0.995	

	Rango de fdp Diciembre 2014 a Marzo 2015		fdp Ensayo	Condición
	Mínimo	Máximo		
G1	0.980	1.000	0.998	CUMPLE
G2	0.994	1.000	0.995	CUMPLE



- 5.9. Se verificó el cálculo del caudal turbinado para los grupos 1 y 2 de la Central Hidroeléctrica San Gabán II.

DATOS DE ENTRADA			
Unidad	: G1	Densidad (kg/m3):	999.10
Potencia (MW)	: 58.187	Presión (bar)	: 64.07
Turbina tipo	: PELTON	Gravedad (m/s2):	9.78
Eje	: VERTICAL	Latitud (°):	13.85
Diametro ingreso (m):	1.1	Altitud (m):	1418.00
Diferencia de altura Z (m):	0.5	Temperatura Agua	
Eficiencia de la turbina (Nt):	0.9058	Turbinada (°C):	15.00
Eficiencia del generador (Ng):	0.9863		

 COMITÉ DE OPERACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL	APROBACIÓN INFORME DE EPE DE LA CH SAN GABÁN II	SUBDIRECCIÓN GESTIÓN DE INFORMACIÓN INFORME N° COES/D/SGI-019-2016
		Fecha: 08 de febrero del 2016

Unidad	:	G2	Densidad (kg/m ³):	999,10
Potencia (MW)	:	57,541	Presión (bar)	64,04
Turbina tipo	:	PELTON	Gravedad (m/s ²):	9,78
Eje	:	VERTICAL	Latitud (°):	13,65
Dímetro ingreso (m):	1,1	Altitud (m):	1416,00	
Diferencia de altura Z (m):	0,5	Temperatura Agua		
Eficiencia de la turbina (Nt):	0,9205	Turbinada (°C):	15,00	
Eficiencia del generador (Ng):	0,9863			

Cálculo de la Altura Neta para una turbina Pelton

$$H_n = P_e + (Z_e - Z_2) + \frac{8Q^2}{g\pi^2 D^4}$$

Cálculo del Caudal turbinado

Para el cálculo indirecto del caudal se utiliza la ecuación siguiente:

$$n_g = P_e / (\rho \times g \times H_n \times Q)$$

De donde:

P_e = Potencia activa (la potencia se ha asumido que corresponde a la mitad para cada turbina, es decir: $P_e/2$)

n_g = Eficiencia del grupo (turbina + generador)

Los valores resultantes del caudal turbinado y altura neta fueron los siguientes:

Q1 =	10,07	m ³ /s	Hn1 =	662,01	m
Q2 =	9,81	m ³ /s	Hn2 =	661,44	m

Por lo tanto el caudal total turbinado es igual: $Q1 + Q2 = Q$ total turbinado

$$Q \text{ total turbinado} = 19,88 \text{ m}^3/\text{s}$$



6. LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES AL INFORME TÉCNICO DEL ENSAYO DE POTENCIA EFECTIVA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II.

6.1. Observación N° 1

En el numeral 7.3.3 literal d) del Procedimiento Técnico N° 18 "Determinación de la Potencia Efectiva de las Centrales Hidroeléctricas" se indica que el ensayo será efectuado operando con un factor de potencia comprendido en un rango definido por el valor promedio $\pm$ dos veces la desviación estándar. Dicho promedio debe determinarse considerando los valores de factor de potencia calculados a partir de la energía activa y

 COMITÉ DE OPERACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL	APROBACIÓN INFORME DE EPE DE LA CH SAN GABÁN II	SUBDIRECCIÓN GESTIÓN DE INFORMACIÓN INFORME N° COES/D/SGI-019-2016
		Fecha: 08 de febrero del 2016

reactiva registrada en las horas de punta para el periodo de diciembre a marzo anterior a los ensayos.

En el informe presentado por SAN GABÁN, cuadro 9.3 "Variabilidad del Factor de Potencia en Bornes de Generación" presenta el factor promedio para los grupos 1 y 2, sin embargo, no adjunta el factor de potencia promedio determinado de acuerdo al numeral 7.3.3 literal d) del PR-18. SAN GABÁN deberá presentar dicha información, para hacer la verificación correspondiente.

Respuesta SAN GABÁN

En la versión final del informe se adjunta un cuadro resumen con la información solicitada, así como también en el Apéndice C se adjunta de manera digital la hoja de cálculo en el que se encuentra la base de datos de los registros de energía activa y reactiva, de diciembre 2014 a mayo 2105.

COES

SAN GABÁN ha incluido en el informe técnico cuadro 9.4 "Factor de Potencia Histórico Diciembre 2014 – Marzo 2015" los datos requeridos por el COES, verificándose que el ensayo fue ejecutado operando con un factor de potencia comprendido en un rango definido por el valor promedio $\pm$ dos veces la desviación estándar.

Observación levantada.

6.2. Observación N° 2

En el cuadro 8.3 "Datos de Sitio" del informe técnico presentado se debe incluir lo siguiente:

- Correlación del plano donde se obtuvo el diámetro de tubería de ingreso a la turbina para los Grupos 1 y 2.
- Los cálculos justificativos de los valores de eficiencia para los Grupos 1 y 2, de acuerdo a las curvas de eficiencia proporcionadas previa al ensayo.
- La densidad del agua utilizada de acuerdo a la temperatura del agua turbinada según la norma IEC 41 vigente.



Respuesta SAN GABÁN

En la nueva versión del informe se incluye un plano en detalle de la válvula de regulación, en el que se puede observar la brida que conecta la tubería en donde se realizó la medición de presión, indicando el punto y el diámetro (1100 mm).

Sea adjunta las curvas de eficiencia correspondientes a las unidades, así como también recalculo los valores de eficiencia para cada unidad se incluyen en el informe de forma detallada.

 COMITÉ DE OPERACIÓN ECONOMICA DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL	APROBACIÓN INFORME DE EPE DE LA CH SAN GABÁN II	SUBDIRECCION GESTION DE INFORMACION INFORME N° COES/D/SGI-019-2016
		Fecha: 08 de febrero del 2016

Se corrige la densidad del agua según la tabla de la norma IEC41, dicha tabla también es adjunta en el informe.

COES

Se verificó en la nueva versión del Informe Final presentado por SAN GABÁN lo siguiente:

- El plano de donde se obtuvo el valor del diámetro de la tubería, siendo 1,1 metros.
- Los cálculos justificativos de los valores de eficiencia para los Grupos 1 y 2 de acuerdo a las curvas de eficiencia.
- El valor de densidad de agua de acuerdo a la norma IEC 41 vigente, siendo $999,1 \text{ m/s}^3$, por tratarse de la temperatura del agua turbinada igual a 15°C .

Observación levantada.

7. CONCLUSION Y RECOMENDACIÓN

Luego de haber revisado el informe de medición, el levantamiento de observaciones y el cálculo de la potencia efectiva de la Central Hidroeléctrica San Gabán II, se determina que SAN GABÁN ha cumplido con los requisitos establecidos en el Procedimiento N° 18 "Determinación de la Potencia Efectiva de las Centrales Hidroeléctricas".

Por lo tanto, se recomienda la aprobación del informe para la determinación de la potencia efectiva de la Central Hidroeléctrica San Gabán II, con los resultados de potencia efectiva de 115 728 kW, potencia de los servicios auxiliares igual a 371,42 kW y un caudal turbinado de $19,88 \text{ m}^3/\text{s}$.

Lima, 08 de febrero del 2016

Fecha	Rev.	Descripción	Elaboró	Revisó	Aprobó
08/02/16	1	Elaboración del Informe	CHL/GTG	TMY	TMY



ANEXO 3: INFORME DE POTENCIA MÍNIMA DE LA CHSGII

Comité de Operación Económica del
Sistema Interconectado Nacional

San Isidro, 29 de octubre de 2021

COES/D-1191-2021

Señor
Gustavo Alonso Garnica Salinas
Representante Legal
SAN GABÁN S.A
Presente. -

Asunto: Informe Técnico de Ensayo de la Potencia Mínima de la C.H. San
Gabán

Ref.: Carta EGESG N° 471-2021-GG recibida el 07.10.2021

De mi consideración:

Me dirijo a usted, en atención a la comunicación de la referencia, mediante la cual nos hace llegar el Informe Técnico de Ensayo de la Potencia Mínima (ITE) de la C.H. San Gabán

Al respecto, le comunicamos que, como resultado de la revisión de la información presentada se concluye que se ha cumplido con el contenido establecido en el numeral 8 del Procedimiento Técnico del COES N° 04 "Ensayos para la Determinación de la Potencia Mínima de las Unidades de Generación del SEIN", por lo que sus resultados, conforme se muestran en el Informe Técnico COES/D/SGI-336-2021 que se adjunta, serán aplicados desde las 00:00 horas del día 31.10.2021.

Sin otro particular, hago propicia la ocasión para saludarlo.

Atentamente,

Firmado Digitalmente por:
LEONARDO LUIS JUAN
DEJO PRADO DN:cn=758981
RUC:20201150733
Cargo: DIRECTOR
EJECUTIVO
Fecha: 29/10/2021 10:00:11

C.c.: DO, DJR, SPR, SCO, SEV, SME, SGI, OSINERGMIN (Ing. Leonidas Sayas - DGE)
Expr: 202100006292



	INFORME COES/D/SGI-336-2021 REVISIÓN DE LOS RESULTADOS DEL INFORME TÉCNICO DE ENSAYO DE POTENCIA MÍNIMA DE LA C.H. SAN GABÁN	SUB DIRECCIÓN DE GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN 29.10.2021
---	--	---

1. ANTECEDENTES

- 1.1. Con fecha 09 de setiembre de 2021, SAN EMPRESA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA SAN GABÁN S.A. (en adelante, SAN GABÁN), presentó al COES la carta EGESG N° 409-2021-GG mediante la cual solicitó la realización del Ensayo de Potencia Mínima (EPMín) de la Central Hidroeléctrica San Gabán (en adelante C.H. San Gabán), para el día 24 de setiembre de 2021; adjuntando para ello la información indicada en el numeral 7.2.1 del Procedimiento Técnico del COES N°04 "Ensayos para la Determinación de la Potencia Mínima de las Unidades de Generación del SEIN"(PR-04).
- 1.2. Con fecha 16 de setiembre de 2021, el COES remitió a SAN GABÁN la carta COES/D-955-2021 con las observaciones a la información técnica presentada.
- 1.3. Con fecha 17 de setiembre 2021, SAN GABÁN presentó al COES la carta EGESG N° 424-2021-GG, completando la información técnica requerida previo a los EPMín.
- 1.4. Con fecha 20 de setiembre de 2021, el COES remitió a SAN GABÁN la carta COES/D-986-2021, mediante la cual comunicó la programación del ensayo de la C.H. San Gabán para el día 24 de setiembre de 2021 y designó como veedor COES al ingeniero Ricardo Varas.
- 1.5. Con fecha 24 de setiembre 2021, se llevó a cabo el EPMín de la Unidad de Generación G2 de la C.H. San Gabán, conforme con el numeral 7.3.9 del PR-04.
- 1.6. Con fecha 07 de octubre de 2021, SAN GABÁN presentó al COES la carta EGESG N° 471-2021-GG con el Informe Técnico de Ensayo de la Potencia Mínima (en adelante, ITE) de la C.H. San Gabán.

2. OBJETIVO

- 2.1. Revisar el contenido del ITE de la C.H. San Gabán, de acuerdo con lo indicado en el numeral 8 del PR-04.

3. BASE LEGAL

- 3.1. Procedimiento Técnico del COES N° 04 "Ensayos para la Determinación de la Potencia Mínima de las Unidades de Generación del SEIN" (PR-04), aprobado mediante Resolución OSINERGMIN N° 030-2021-OS/CD.





SGI
REVISIÓN DEL CONTENIDO DEL ITE
DE LA UNIDADES DE GENERACIÓN DE LA C.H. SAN GABÁN
OCTUBRE - 2021

4. DOCUMENTOS PRESENTADOS

- 4.1. Carta remitida por SAN GABÁN con correlativo EGESG N° 471-2021-GG recibida el 07.10.2021.
- 4.2. Archivo digital: "INFORME TÉCNICO DE ENSAYO DE LA POTENCIA MÍNIMA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN", octubre 2021, elaborado por HAMEK.

5. OBSERVACIONES

- 5.1. No se tiene observaciones.

6. CONCLUSIONES

- 6.1. Luego de la revisión del contenido del ITE de la C.H. San Gabán, se concluye que se ha cumplido con el contenido establecido en el numeral 8 del PR-04. Por tanto, los valores de Potencia Mínima a aplicar por el COES se detallan en los Cuadros N° 1 y N° 2 que continúa.





SGI
REVISIÓN DEL CONTENIDO DEL ITE
DE LA UNIDADES DE GENERACIÓN DE LA C.H. SAN GABÁN
OCTUBRE - 2021

Cuadro N° 1

**Potencia Mínima de las
Unidades de Generación de la C.H. San Gabán**

Unidad de Generación	Potencia Mínima [MW]
G1	5,00
G2 ¹	5,00

Cuadro N° 2

**Potencia Mínima de la
C.H. San Gabán**

Central Hidroeléctrica	Potencia Mínima [MW]
San Gabán ¹	5,00

San Isidro, 29 de octubre de 2021

Fecha	Rev.	Descripción	Elaboró	Revisó	Aprobó
29/10/2021	1	Elaboración del Informe	RV	RV/JI	JI

¹ Conforme al numeral 7.3.9 del PR-04.





ANEXO 1 FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN

AUTORIZACIÓN PARA LA INCORPORACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UANCV

Formato digital ☒

Fecha de entrega: _____

1. Datos del autor (es):

Nombres y Apellidos: ROGER AMILCAR MONTES DE OCA PAREDES

Dirección: JR. LIMA 419 - PUNO

DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: 40472001

Teléfono: 951993235 email: amilcar.mdo@gmail.com

Nombres y Apellidos: _____

Dirección: _____

DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: _____

Teléfono: _____ email: _____

Facultad y/o Escuela de Posgrado: INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

Escuela Profesional o Mención: INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

Título o Grado Académico a optar: INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

Asesor: ING. CARLOS ALEJANDRO CACERES VARGAS

Esta obra se encuentra dentro de las siguientes denominaciones:

Trabajo de Investigación ☐ Tesis ☒ Trabajo de Suficiencia Profesional ☐ Trabajo Académico ☐

Título: OPTIMIZACIÓN CON GAMS DEL DEPACHO DE ENERGÍA DE LOS GRUPOS DE
GENERACIÓN DE LA CENTRA HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II
DURANTE LOS MESES DE ESTIAJE

Palabras claves, (3 a 5 términos): Despacho de energía, generación hidroeléctrica, modelamiento en GAMS, optimización
operacional, San Gabán II

¿Esta obra se desarrolló en la UANCV ^{1, 2}?

1

¹ Indicar si su producción intelectual ha empleado recursos tales como, instalaciones, laboratorios, insumos, equipos, bases de datos, asesoría técnica por parte del personal de la UANCV, financiamiento, entré otros relacionados.

² Si su producción intelectual se desarrolló en la UANCV totalmente o parcialmente, deberá autorizar el depósito en el Repositorio de manera obligatoria.



2. Referencia de tesis:

☐ Bachiller ☒ Título ☐ 2da Especialidad ☐ Maestría ☐ Doctorado

3. Licencias:

a) Licencia estándar:

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi tesis en el Repositorio Digital de la UANCV.

Con la autorización de depósito de mi producción intelectual, otorgo a la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" una licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi producción intelectual (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Digital de tesis UANCV, colección de producción intelectual, entre otros, en el Perú y en el extranjero por el tiempo y veces que considere necesarias, y libres de remuneraciones.

En virtud de dicha licencia, la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" podrá reproducir mi producción intelectual en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que la producción intelectual es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicha producción intelectual no infringe derechos de autor de terceras personas.

La Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" consignará el nombre del y/o los autor(es) de la producción intelectual, y no le hará ninguna modificación más que la permitida en la licencia.

Autorizo su publicación (marque con una X)

- ☒ Sí, autorizo que se deposite inmediatamente.
- ☐ Sí, autorizo que se deposite a partir de la fecha (d/m/a): _____
- ☐ No autorizo.

b) Licencia CREATIVE COMMONS 4.0 INTERNACIONAL:

Si usted concede una licencia CREATIVE COMMONS sobre su producción intelectual, mantiene la titularidad de los derechos de autor de esta y, a la vez, permite que otras personas puedan reproducirla, comunicarla al público y distribuir ejemplares de esta, bajo las condiciones siguientes:

¿Quiere permitir usos comerciales de su producción intelectual?

Sí: significa que usted permite la reproducción, distribución y comunicación pública de la producción intelectual incluso con fines comerciales.

No: significa que usted permite la reproducción, y comunicación pública de la producción intelectual, pero sin fines comerciales.

- ☒ Sí autorizo
- ☐ No autorizo



Jurisdicción de su Licencia

Todas las licencias CREATIVE COMMONS son de ámbito mundial, sin embargo, usted puede elegir entre la opción “internacional” o una adaptada a su jurisdicción, como para el caso peruano.

La opción “internacional” emplea el lenguaje y la terminología de los tratados internacionales; en cambio, la adaptada a su jurisdicción, recoge las particularidades de la legislación peruana.

En consecuencia, **la opción “internacional” goza de una mayor eficacia a nivel mundial, gracias a que tiene jurisdicción neutral.** Mientras que la opción adaptada a la jurisdicción del Perú goza de una mayor eficacia ante los tribunales peruanos.

☒ Internacional

☐ Nacional

Línea de investigación: INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA ELÉCTRICA - P18

Firma de Autor



huella digital

14 DE ABRIL DEL 2026

Fecha