



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ALGORITMO PARA MAXIMIZAR LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA EN UN
SISTEMA HIDROELÉCTRICO CON EMBALSE DE REGULACIÓN**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniera Civil

AUTORA: Nayrim Anahy Proaño Pazmiño
TUTOR: Christian Gonzalo Domínguez González

Quito - Ecuador
2024


CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Nayrim Anahy Proaño Pazmiño con documento de identificación N°1751698885
manifiesto que:

Soy la autora y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 30 de enero del 2024

Atentamente,



Nayrim Anahy Proaño Pazmiño

1751698885


CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Nayrim Anahy Proaño Pazmiño con documento de identificación N°1751698885, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del Proyecto Técnico: “Algoritmo para maximizar la producción energética en un sistema hidroeléctrico con embalse de regulación”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 30 de enero del 2024

Atentamente,



Nayrim Anahy Proaño Pazmiño


1751698885

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Christian Gonzalo Domínguez González con documento de identificación N°1716568785, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ALGORITMO PARA MAXIMIZAR LA PRODUCCIÓN ENERGÉTICA EN UN SISTEMA HIDROELÉCTRICO CON EMBALSE DE REGULACIÓN, realizado por Nayrim Anahy Proaño Pazmiño con documento de identificación N° 1751698885, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 30 de enero del 2024

Atentamente,



Ing. Christian Gonzalo Domínguez González, PhD

1716568785

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional; a mis extraordinarios Padres, Wilson Proaño y Mirian Pazmiño por su noble dedicación y amor, por ser mis amigos, mis consejeros, y por siempre guiarme y ser la voz y bendición de Dios como prioridad en mi vida.

Nayrim

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por su infinita bondad, y por haber estado conmigo en los momentos que más lo necesitaba, por darme salud, fortaleza y sabiduría, por haberme permitido culminar un peldaño más de mis metas, y porque tengo la certeza y el gozo de que siempre va a estar conmigo.

Mi gratitud y admiración a mi amada madre, este logro no es solo mío, igual es tuyo mamá, eres ejemplo de perseverancia, que ha dado todo por su hogar, me has guiado y acompañado en cada paso de mi vida apoyándome incondicionalmente. Gracias por creer en mi a pesar de muchas veces querer desistir, espero de ahora en adelante poder retribuir no solo tu amor sino todo lo que has dado por mí.

Nayrim

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I	1
ANTECEDENTES Y GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Problema de estudio	2
1.2.1 Antecedentes	2
1.2.2 Importancia y Alcance	2
1.2.3 Delimitación	3
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo General	5
1.4.2 Objetivos Específicos	5
CAPÍTULO II	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1 Energía hidráulica en la naturaleza	6
2.1.1 Ciclo hidrológico	6
2.1.2 Energía en el agua	7
2.2 Principio de la conservación de la energía	7
2.2.1 Energía potencial	8
2.2.2 Energía cinética	9
2.2.3 Energía mecánica	9
2.3 Conceptos y ecuaciones básicas del movimiento de líquidos	9
2.3.1 Flujo ideal	9
2.3.2 Ecuación de continuidad	10
2.3.3 Principio de Bernoulli	11
2.4 Principios Hidroenergéticos	14
2.5 Potencia instalada P_{inst}	15
2.6 Perdidas de energía	16
2.6.1 Eficiencias η	16
2.7 Carga Hidráulica	17

2.7.1 Carga de agua H	17
2.7.2 Carga bruta H _b	17
2.7.3 Carga Neta H _n	17
2.8 Energía hidráulica	18
2.8.1 Energía firme	18
2.8.2 Energía secundaria	19
2.8.3 Energía total	19
2.8.4 Factor de planta	19
2.9 Centrales hidroeléctricas	20
2.9.1 Clasificación de las centrales hidroeléctricas	21
2.9.1.1 Clasificación según su régimen de flujo	21
2.9.1.1.1 Centrales de agua fluyente, por derivación o de pasada:	21
2.9.1.1.2 Centrales de Embalse	21
2.9.1.1.3 Centrales de bombeo o reversibles	22
2.9.1.2 Clasificación administrativa	23
2.9.2 Partes de una central hidroeléctrica con embalses de regulación	25
2.9.2.1 Embalses	25
2.9.2.1.1 Características de los embalses	26
2.9.2.1.2 Niveles de Embalse	28
2.9.2.1.3 Volúmenes de embalse	29
2.9.3 Vertedero hidráulico o aliviadero	30
2.9.3.1 Vertedero controlado por compuertas	31
2.9.3.2 Vertederos de descarga libre	31
2.9.4 Obra de toma	31
2.9.5 Tubería forzada	31
2.9.6 Turbinas	32
2.9.6.1 Tipos de turbinas hidráulicas	32
2.9.7 Generador y transformador	33
2.9.8 Líneas eléctricas	34
2.9.9 Canal de descarga	34

CAPÍTULO III	35
METODOLOGÍA	35
3.1 Hidrología	35
3.1.1 Descripción de la cuenca hidrográfica	35
3.1.2 Serie hidrológica de caudales medios mensuales del sitio G8	37
3.1.3 Curvas Elevaciones– Áreas– Capacidades	37
3.1.3.1 Análisis de los niveles característicos de embalse	38
3.1.4 Curva de descarga	41
3.2 Procesos técnicos para cálculos hidro energéticos	42
3.2.1 Proceso técnico para determinación de Potencia y Energía.	42
3.2.2 Proceso técnico para determinación de niveles y volúmenes en el embalse	43
3.2.3 Proceso técnico para determinación de energías en tránsito y acumulada	47
3.2.3.1 Energía de tránsito	47
3.2.3.2 Energía acumulada	47
3.2.3.3 Energía total	48
3.2.4 Proceso técnico para la determinación de la potencia media diaria	49
CAPÍTULO IV	51
ALGORITMO	51
4.1 Datos de entrada	51
4.2 Procesamiento de datos iniciales	51
4.2.1 Determinación de las potencias	52
4.2.2 Determinación de energías máximas	53
4.2.3 Determinación de nivel aguas abajo y carga	53
4.2.4 Determinación de volúmenes máximos energéticos	54
4.2.5 Determinación de niveles y volúmenes en el embalse	55
4.3 Casos en función del volumen disponible	56
4.3.1 Caso E	57
4.3.2 Caso D	58
4.3.3 Caso C	60
4.3.4 Caso B	61

4.3.5 Caso A	62
4.3.6 Maximización de la energía	64
4.3.7 Aplicación del Algoritmo	64
4.3.7.1 Curvas de embalse	65
4.3.7.2 Caudal	65
4.3.7.3 Información general	66
CAPÍTULO V	71
APLICACIÓN DEL ALGORITMO AL CASO DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO SANTIAGO.	71
5.1 Caso a nivel de factibilidad y diseños definitivos del Proyecto hidroeléctrico Santiago.	71
5.1.1 Escenario 1	74
5.1.1.1 Datos de entrada	75
5.1.1.2 Resultados	75
5.1.2 Escenario 2	85
5.1.2.1 Datos de entrada	86
5.1.2.2 Resultados	88
5.2 Caso hipotético - Escenario 3	95
5.2.1 Datos de entrada	95
5.2.2 Resultados	97
CONCLUSIONES	100
RECOMENDACIONES	102
REFERENCIAS	104
ANEXOS	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Clasificación de Hidroeléctricas por rangos de potencia según CONELEC.	23
Tabla 2	Clasificación de Hidroeléctricas por rangos de Potencia y Saltos según OLADE	24
Tabla 3	Potencia total efectiva y número de centrales del Ecuador	24
Tabla 4	Clasificación de los embalses	26
Tabla 5	Niveles característicos de embalse del Proyecto Santiago.	40
Tabla 6	Datos hidroenergeticos calculados	68
Tabla 7	Tabla resumen proporcionada en el módulo de resultados	70
Tabla 8	Curvas Elevaciones-Áreas- Capacidades (Curvas de Embalse)	72
Tabla 9	Datos históricos de caudales medios mensuales (m ³ /s) en sitio del Proyecto G8	73
Tabla 10	Datos de caudales medios mínimos Q(90) y máximos Q(10)	74
Tabla 11	Ingreso de datos de la central hidroeléctrica-Escenario 1 al algoritmo	76
Tabla 12	Ingreso de datos hidrológicos (Escenario 1) al algoritmo	76
Tabla 13	Datos hidroenergéticos calculados (Escenario 1) en el algoritmo	77
Tabla 14	Ingreso de datos de embalse (Escenario 1) al algoritmo	77
Tabla 15	Resumen de resultados de la simulación en la central - Escenario 1	82
Tabla 16	Resumen de resultados de la simulación con NMOE optimizado - Escenario 1	83
Tabla 17	Ingreso de datos de la hidroeléctrica (Escenario 2) al algoritmo	86
Tabla 18	Datos hidroenergéticos (Escena 2) en el algoritmo	87
Tabla 19	Ingreso de datos (Escenario 2) al algoritmo	87
Tabla 20	Resumen resultados de la simulación-Escenario 2	91
Tabla 21	Resumen de resultados de la simulación con NMOE optimizado - Escenario 2	93
Tabla 22	Caudales medios mensuales del Escenario 3	95
Tabla 23	Ingreso de datos del Escenario 3 al algoritmo	96
Tabla 24	Ingreso de datos hidrológicos del escenario 3 al algoritmo	96

Tabla 25 Datos hidro energéticos del escenario 3 al algoritmo _____ 96

Tabla 26 Ingreso de datos de embalse del escenario 3 al algoritmo _____ 97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del Proyecto Hidroeléctrico Santiago -----	3
Figura 2. Ciclo hidrológico _____	6
Figura 3. Experimento de Joule. _____	8
Figura 4. Fluido moviéndose a través de una tubería -----	10
Figura 5. Cuantificación de la energía en un tramo de río -----	12
Figura 6. Esquema de energía en una central hidroeléctrica-----	18
Figura 7. Esquema tecnológico de una central hidroeléctrica -----	20
Figura 8. Ruedas hidráulicas _____	21
Figura 9. Clasificación general de las centrales hidroeléctricas -----	22
Figura 10. Construcción de las curvas Cota-Área-Volumen de un embalse-----	27
Figura 11. Representación de los niveles característicos de un embalse -----	30
Figura 12. Diferentes tipos de rotor de turbinas -----	33
Figura 13. Localización de la cuenca río Santiago-----	36
Figura 14. Curvas Elevación- Área- Capacidad -----	38
Figura 15. Vista en planta de la formación de embalse en el sitio PH Santiago -----	39
Figura 16. Grafica de la curva de descarga de la cuenca del río Santiago -----	41
Figura 17. Características de un embalse-----	44
Figura 18. Curva de energías totales -----	48
Figura 19. Curva de duración de las potencias medias diarias de la Central Hidroeléctrica -----	49
Figura 20. Caso E -Niveles en el embalse-----	57
Figura 21. Caso D -Niveles en el embalse -----	59
Figura 22. Caso C -Niveles en el embalse-----	60
Figura 23. Caso B -Niveles en el embalse-----	61

Figura 24. Caso A -Niveles en el embalse -----	63
Figura 25. Datos de la central hidroeléctrica que ingresar al algoritmo -----	66
Figura 26. Datos hidrológicos que ingresar al algoritmo-----	67
Figura 27. Datos del embalse que ingresar al algoritmo-----	68
Figura 28. Datos de ingreso al algoritmo para graficar la curva de energías -----	69
Figura 29. Representación de los niveles de embalse en el sitio del proyecto G8-Escenario 1-	75
Figura 30. Hidrograma de caudales medios mensuales del Proyecto Santiago -----	78
Figura 31. Curva de duración de potencias medias diarias-Escenario 1 -----	79
Figura 32. Gráfica de producción de las energías medias diaria, Q10 y Q90 - Escenario 1 -----	80
Figura 33. Gráfica de los casos en los niveles de embalse-Escenario 1-----	81
Figura 34. Curvas de características energéticas- Escenario 1 -----	83
Figura 35. Comparación de energía con y sin optimización del caudal histórico-Escenario 1 -	84
Figura 36. Representación de los niveles de embalse en el sitio del proyecto G8-Escenario 1-	85
Figura 37. Curva de duración de potencias medias diarias-Escenario 2 -----	88
Figura 38. Gráfica de producción de las energías medias diaria, Q10 y Q90 - Escenario 2	90
Figura 39. Grafica de los casos en los niveles de embalse- Escenario 2-----	91
Figura 40. Curvas de características energéticas-Escenario 2 -----	93
Figura 41. Comparación de energía con y sin optimización del caudal histórico-Escenario 2 -	94
Figura 42. Curva de características energéticas (Escenario 3) -----	98
Figura 43. Comparación de la energía diaria generada utilizando los distintos niveles mínimos de operación(NMOE)-Escenario 3.....	99

RESUMEN

Este proyecto técnico ha sido realizado con el objeto de estimar la máxima producción energética de una central hidroeléctrica con embalse de regulación, mediante la optimización del nivel mínimo de operación del embalse (NMOE). Para cumplir este objetivo, se ha desarrollado una aplicación que simula el funcionamiento de regulación en el embalse y cuantifica las energías en tránsito y acumulada. A partir del uso de un algoritmo de optimización, se estima el NMOE con el que se obtiene la máxima energía producida por la central hidroeléctrica. La aplicación utiliza como datos de entrada los caudales afluentes en el río, la curva de descarga en el sitio del proyecto, las curvas cota-área-capacidad en el embalse, la potencia instalada en la central con su respectiva eficiencia y factor de planta. Para probar la aplicación, se analizaron tres escenarios, los dos primeros toman como base al Proyecto Hidroeléctrico Santiago a nivel de factibilidad y de estudios definitivos por etapas, y un tercer escenario hipotético bajo diferentes condiciones para probar el uso del algoritmo. Como resultado de los escenarios 1 y 2, se obtuvo que la producción de energía en tránsito es preponderante debido a la limitada capacidad del vaso, respecto a la entrada de caudales relativamente grandes. Para el escenario 3, se priorizó el uso del embalse aumentando su capacidad y como resultado se obtuvo una magnitud similar de la energía acumulada y en tránsito, que permitió encontrar un valor del NMOE óptimo para la máxima generación de energía diferente al nivel mínimo o máximo en el embalse. El desempeño del algoritmo es adecuado bajo las distintas condiciones presentadas por los diferentes escenarios y en todos se ha logrado cumplir con el objetivo relacionado a la maximización de la energía.

Palabras clave: hidroeléctrica, embalse, algoritmo, optimización, simulación.

ABSTRACT

This technical project has been carried out with the aim to estimate the maximum energy production of a hydroelectric power plant with a regulating reservoir, through the optimization of the minimum reservoir operation level (MROL). To achieve this objective, an application has been developed to simulate the regulation operation in the reservoir and quantify the transit and accumulated energies. By using an optimization algorithm, the MROL is estimated to obtain the maximum energy produced by the hydroelectric power plant. The application uses as input data the incoming flows in the river, the discharge curve at the project site, the height-area-capacity curves in the reservoir, the installed power in the plant with its respective efficiency and capacity factor. To test the application, three scenarios were analyzed. The first two scenarios are based on the Santiago Hydroelectric Project, considering feasibility and definitive stages studies, while the third scenario is a hypothetical case under different conditions to test the algorithm's use. As a result of scenarios 1 and 2, it was found that the energy production in transit is predominant due to the limited reservoir capacity compared to the relatively large inflows rates. For scenario 3, the emphasis was placed on increasing the reservoir capacity, obtaining a similar magnitude of accumulated and in-transit energy. This allowed finding an optimal MROL for maximum energy generation, different from the minimum or maximum level in the reservoir. The algorithm's performance is suitable under the various conditions presented by the different scenarios, and in all cases, the objective related to energy maximization has been achieved.

Keywords: hydroelectric, reservoir, algorithm, optimization, simulation.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

1.1 Introducción

La energía eléctrica es un recurso necesario para la realización de actividades cotidianas, para servicios de salud, educación y el desenvolvimiento en el sector industrial y comercial que son motores de creación de empleo. La energía eléctrica es un recurso vital para el desarrollo socioeconómico de un país, y Ecuador no es la excepción.

“Históricamente la matriz energética ecuatoriana se basó en combustibles fósiles llegando a representar el 84% de las fuentes de energía en el país. Por los cambios experimentados en el medio ambiente en los últimos años, como consecuencia de las emisiones de CO₂ y de gases efecto invernadero, ha sido necesario reformar la matriz energética a través de fuentes renovables. Los recursos obtenidos a partir del agua se han convertido en un elemento importante debido a la posibilidad que tiene de ser aprovechada al brindar energía ilimitada y barata, llevando así a consolidarse varios megaproyectos hidráulicos a lo largo del territorio nacional” (ARCONEL,2015)

Para satisfacer esta creciente demanda, Ecuador ha diversificado su matriz energética, con una mayor incorporación de fuentes renovables, lo cual ha impulsado considerablemente aprovechar el potencial de los ríos con construcciones a gran escala que represan el agua creando lagos artificiales, llamadas centrales de embalse, que logran explotar la energía contenida en una masa de agua ubicada a cierta altura y regular la fuerza de su caída generando así energía eléctrica. Esto conlleva a que se busque establecer reglas eficientes de operación que permitan aumentar la cobertura eléctrica y mejorar la calidad de servicio para satisfacer las necesidades de sus ciudadanos y sectores productivos.

Este trabajo presenta un modelo de simulación matemático para el cálculo de energía, que es una solución que utiliza técnicas de optimización mediante un algoritmo implementado con la herramienta solver en Excel, que permite determinar la mejor decisión de operación del NMOE con un almacenamiento adecuado de agua, para lograr una producción de energía óptima en un horizonte de tiempo determinado.

1.2 Problema de estudio

1.2.1 Antecedentes

La cota de operación de embalse representa una variable muy importante en la producción hidro energética, un análisis de ello incluye simulaciones de operación del embalse a fin de establecer los volúmenes requeridos para determinar los porcentajes de garantía con los que pueden ser satisfechos diferentes niveles de demanda; de esta manera se determinan los indicadores energéticos de las centrales hidroeléctricas propuestas, operando con caudales regulados.

En la bibliografía existente para la elaboración de proyectos de centrales hidroeléctricas con embalse, en las cotas de operación regularmente se toma como variables de restricción a los niveles máximo y mínimo de operación normal, sin tomar en cuenta el análisis de optimización desde la perspectiva de maximizar la producción energética anual, que se podría lograr al identificar la cota mínima de operación

1.2.2 Importancia y Alcance

Al elaborar el algoritmo se contribuye al avance del conocimiento en el campo de la optimización y gestión de centrales hidroeléctricas, pudiendo beneficiar a estudiantes y profesionales interesados en el campo de la hidráulica, brindando una herramienta que puede

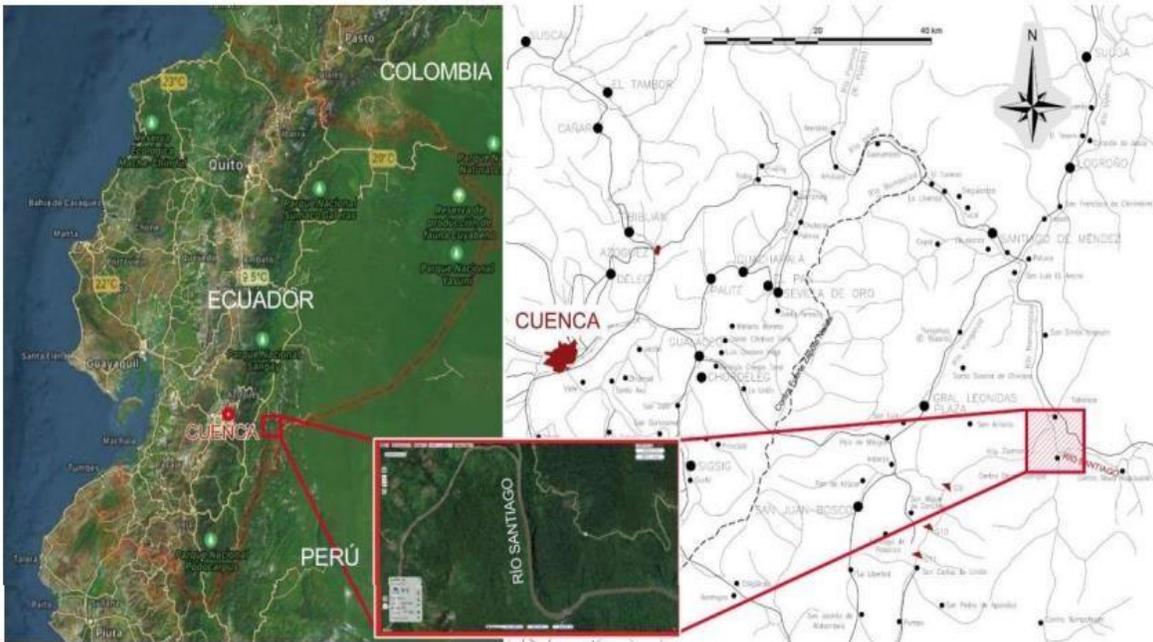
aportar soluciones concretas para mejorar la generación de energía que en su formulación general es aplicable a cualquier central hidroeléctrica que utilice un embalse de regulación.

1.2.3 Delimitación

El Proyecto hidroeléctrico Santiago se ubica en la parte suroriental de la República de Ecuador, en la región hidrográfica del Amazonas. El sitio del proyecto se encuentra en la provincia de Morona Santiago en los cantones Tiwintza y Limón Indaza; el eje de presa se encuentra en el río Santiago entre la confluencia de los ríos Zamora y Namangoza, y la confluencia del río Santiago con el río Coangos. El eje de la presa se encuentra en las coordenadas UTM: 809402 Este y 96655559 Norte.

Figura 1

Ubicación del Proyecto Hidroeléctrico Santiago



Nota. Mapa con la ubicación del proyecto a lo largo del Río Santiago, en la Región Amazónica.

Fuente: CELEC-EP (2021a).

1.3 Justificación

“Ecuador priorizó la generación de energía eléctrica a través de energías renovables, principalmente la hidroeléctrica. En sentido de la producción total de energía disponible en el Sistema Nacional Interconectado para el consumo nacional y las exportaciones, el 91% corresponde a energía hidráulica y, en noviembre de 2020, el 77% de la producción energética del país, se la ha realizado a través de centrales hidroeléctricas” (CELEC EP, 2021b).

Al maximizar la generación de energía en una central hidroeléctrica, se garantiza un uso más efectivo de los recursos disponibles, esto asegura que los recursos naturales como el agua almacenada en el embalse, se utilice de manera más eficiente para producir la mayor cantidad de energía. Al regular el flujo de agua en el embalse se garantiza un suministro constante y confiable en situaciones de demanda fluctuante o estacional y de igual manera proporciona un recurso estratégico para afrontar situaciones de emergencia o sequías.

Al aumentar la producción, se puede exportar excedentes de energía a otros países, generando ingresos adicionales, dando un impacto positivo en la economía local y nacional, además, el acceso a una fuente confiable de energía eléctrica beneficia a la población a impulsar el desarrollo de diversas industrias y mejorar la calidad de vida, contribuyendo de igual manera a reducir la dependencia de combustibles fósiles, fomentando un enfoque más sostenible y amigable con el medio ambiente.

El algoritmo que se propone será aplicable para estudios hasta nivel de factibilidad de cualquier sistema hidráulico fluvial energético con embalse de regulación y con una central sea de derivación o a pie de presa. El algoritmo lo que buscará será determinar la mejor política de operación para el embalse, con el propósito de maximizar la producción de energía eléctrica,

considerando las restricciones hidrológicas y operativas del sistema. En calidad de ejemplo, el algoritmo será aplicado al proyecto hidroeléctrico Santiago.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Elaborar un algoritmo que permita maximizar la producción energética anual en un sistema hidroeléctrico con embalse de regulación, mediante el uso de un modelo matemático para evaluar su factibilidad.

1.4.2 Objetivos Específicos

Formular un modelo matemático que permita cuantificar las energías acumulada y de tránsito en un sistema hidroeléctrico con embalse de regulación.

Establecer los criterios y procedimientos para maximizar la energía sumatoria anual producida en un sistema hidroeléctrico con embalse de regulación.

Elaborar el programa de cálculo basado en las variables de decisión obtenidas de la serie de caudales afluentes a la cuenca

Aplicar y verificar el programa de cálculo para el caso del proyecto hidroeléctrico Santiago.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Energía hidráulica en la naturaleza

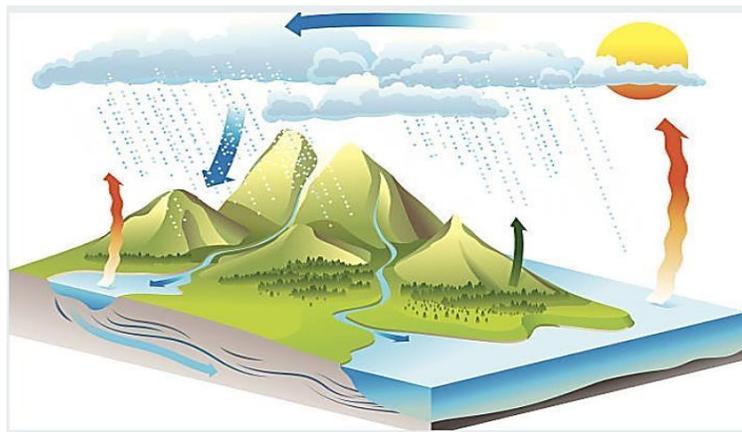
2.1.1 *Ciclo hidrológico*

El sol incide en la tierra de forma directa calentando las superficies de océanos, mares y otros lugares que contienen cuerpos de agua sobre la tierra, estos son evaporados en forma de pequeñas partículas y llevados por las corrientes de aire distribuyéndolas en la atmósfera, provocando así la formación de nubes, que se descargan en forma de lluvia y se precipitan sobre la tierra dando lugar a la formación de riachuelos, ríos y mantos acuíferos (Figura 2).

Posteriormente estos siguen su curso hacia los mares y océanos que, por acción del calor de radiación en la tierra, estos nuevamente son evaporados y desplazados por el viento provocando se eleven a la atmósfera, dándose la condensación y precipitación del agua, provocando así este ciclo constante en la naturaleza, como un recurso renovable.

Figura 2

Ciclo hidrológico



Nota. Circulación del agua por el planeta tierra en sus diferentes estados. Fuente: Zarza (2019)

2.1.2 *Energía en el agua*

El agua al precipitarse se acumula a diferentes alturas sobre la tierra, está al encontrarse en las partes más altas almacena energía potencial gravitatoria y su conducción hacia las partes más bajas, al caer libremente es transformada en energía cinética, llamada también energía de velocidad, que se forma del trabajo realizado por el movimiento del agua, por a la intervención de fuerzas de fricción entre partículas y el rozamiento con las paredes del cauce, su erosión y el transporte de los sedimentos en suspensión. Este aprovechamiento de energías radica que entre mayor sea la diferencia de niveles y más grande sea el caudal, directamente proporcional será la energía hidráulica que posee.

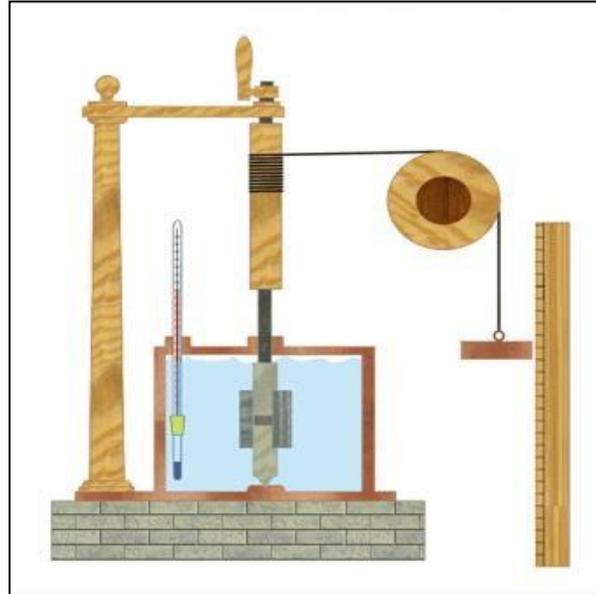
2.2 Principio de la conservación de la energía

“La energía no se crea, ni se destruye, solo se transforma”, quien dedujo esto fue el físico James Joule en 1843. Su experimento consistió en demostrar que el calor no era más que una forma de energía. En su experimento uso un recipiente de agua acoplado a un eje con paletas que, por acción de una pesa, se ponen en movimiento tal y como se muestra en la figura 3. Al caer la pesa a una velocidad prácticamente constante, pierde energía potencial, y como resultado el agua es agitada por el movimiento giratorio de las paletas, esto hace que aumente la temperatura en el agua y esta se caliente.

Con este experimento, demostró que se puede elevar la temperatura del agua mediante la transferencia de energía mecánica.

Figura 3

Experimento de Joule.



Nota. Experimento de Joule que llevó a la teoría de la conservación de energía y el primer principio de la termodinámica. Fuente: Blas (2018).

Para entender más a fondo el concepto de energía mecánica es necesario analizar la energía de un objeto que se encuentra a una cota y luego adquiere un movimiento. La energía mecánica es la suma de dos tipos diferentes de energías, tales como potencial y cinética.

2.2.1 *Energía potencial.*

Esta representa la energía almacenada en un cuerpo que resulta de la posición en que se encuentre respecto a un sistema. La energía potencial que posee un cuerpo está dada, por estar inmerso en un campo gravitatorio, debido a la posición en el que se encuentre con respecto a la superficie terrestre; también conocida como energía potencial gravitacional.

2.2.2 *Energía cinética*

Es el trabajo realizado por todas las fuerzas actuantes sobre un cuerpo con masa, que acumula energía a medida que alcanza velocidad. Esta energía es la que posee un cuerpo debido a su movimiento.

2.2.3 *Energía mecánica*

Como resultado está energía es la que presenta un cuerpo con respecto a su posición y su energía asociada al movimiento. La conservación de la energía establece que, en un sistema libre de fricciones, la cantidad de energía mecánica se conserva en el tiempo, es decir que la suma de la energía cinética y potencial se mantienen constantes, por lo tanto:

$$\text{Energía Potencial} + \text{Energía cinética} = \text{Energía mecánica}$$

2.3 Conceptos y ecuaciones básicas del movimiento de líquidos

2.3.1 *Flujo ideal*

En hidráulica, el fenómeno hipotético del “flujo ideal” ocurre bajo las siguientes características:

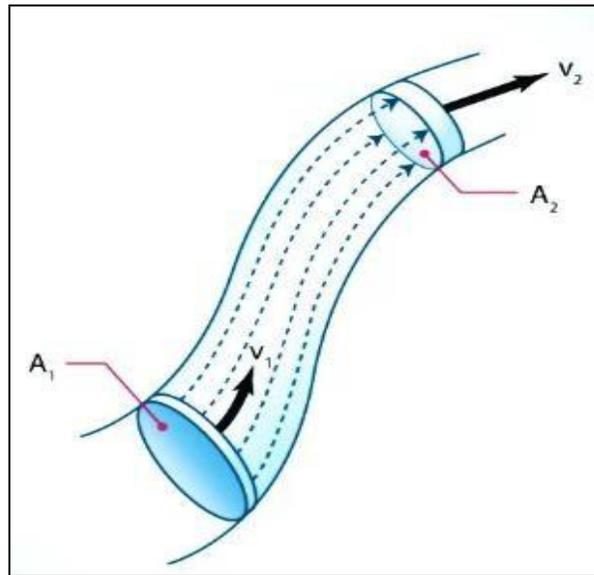
- *Homogéneo*.- su densidad es la misma en todas las partes del flujo.
- *No viscoso*.- su viscosidad es nula, se desprecia la fricción interna entre partículas, es decir que tiene absoluta libertad de movimiento en el punto que se encuentre.
- *Estacionario*.- Su velocidad en un punto cualquiera permanece constante en el tiempo.
- *Incomprensible*.- su densidad es constante en cualquier condición de presión, no reducen su volumen.
- *Irrotacional*.- carece de velocidad angular neta, no hay esfuerzo cortante que haga que el fluido rote.

2.3.2 Ecuación de continuidad

Para entender este concepto es necesario que se plantee el siguiente ejemplo. Dónde se analiza a un flujo ideal, en movimiento a través de una tubería (figura 4).

Figura 4

Fluido moviéndose a través de una tubería



Nota. Flujo dentro de una tubería, en donde se explica fácilmente la ecuación de continuidad. $A_1 = A_{entrada}$; $A_2 = A_{salida}$; $V_1 = \bar{u}_e$; $V_2 = \bar{u}_s$. Fuente: Ramírez (2021).

Si no existe la pérdida de fluido a causa de una fuga, entonces se deduce que la cantidad de masa que entra en un determinado intervalo de tiempo es igual a la cantidad de masa que sale, si la masa que entra es mayor a la que sale o viceversa, eso significaría que la tubería se rompa a causa de esta acumulación, por ende, un caso así físicamente hablando es imposible.

Por lo tanto, se puede decir que el caudal de entrada es el mismo que el caudal de salida:

$$Q_{entrada} = Q_{salida} \quad (e 1)$$

Con ello, se analiza que este caudal, es la masa que pasa a través de la tubería en un diferencial de tiempo:

$$m_{entrada}\Delta t = m_{salida} \Delta t \quad (\text{e 1.1})$$

Y que la densidad que ocupa un fluido es igual a su masa sobre el volumen

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{e. 2})$$

Si, se despeja la masa de la fórmula general de la densidad se obtiene lo siguiente:

$$m = \rho * v \quad (\text{e 2.1})$$

Reemplazando esta ecuación (e. 2.1) en (e. 1.1) y considerando que el volumen del agua en un determinado paso del tiempo es igual al área transversal de la tubería por la distancia recorrida (d), ésta va a ser igual a:

$$A_{entrada} * d_{entrada} * \rho * \Delta t = A_{salida} * d_{salida} * \rho * \Delta t \quad (\text{e 3})$$

Es bien sabido que la distancia que recorre un cuerpo en un determinado intervalo de tiempo es igual a la velocidad y que, al trabajar con fluidos ideales, es decir incomprensibles, la densidad del líquido de entrada es el mismo que el de salida, entonces la ecuación es la siguiente:

$$A_e * \bar{u}_e = A_s * \bar{u}_s \quad (\text{e 3.1})$$

La expresión anterior recibe el nombre de ecuación de continuidad del flujo.

2.3.3 Principio de Bernoulli

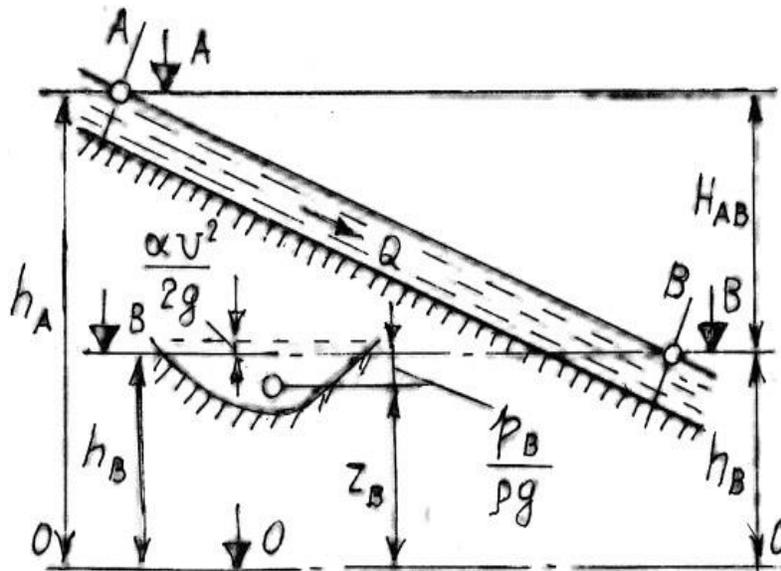
Describe el comportamiento de un fluido, que se mueve a lo largo de una línea de corriente, este fluido se lo expresa como ideal y que la energía que este posee es constante en todo su recorrido.

Al considerar un tramo de río, entre las secciones A y B se puede determinar, entonces, la energía de esta sección de flujo, tomando en cuenta que a lo largo de este cauce existen valores

constantes y una velocidad media. Al aplicar la ecuación de Bernoulli en la unidad de peso del agua, igual a 1 Newton, se puede deducir las siguientes ecuaciones.

Figura 5

Cuantificación de la energía en un tramo de río.



Nota. La suma $Z_B + \frac{\rho_B}{\rho g}$ determina la reserva de la energía potencial en la sección considerada; Z_B .- energía de posición; ρ/γ .- energía de presión; $\alpha v^2/2g$ determina la energía cinética específica (energía de velocidad); h_A y h_B cota de la superficie libre, respecto al nivel de referencia; H_{AB} .- caída del nivel de la superficie libre en el tramo AB.

Fuente: Calero (2021).

La reserva de la energía específica total es igual a la suma de las energías de posición, más la de presión y más la de velocidad.

$$e = z + \frac{\rho}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (e 4)$$

Dónde

e .-Energía específica (J o N.m)

z .-cota de la sección considerada, respecto al nivel de referencia (m)

$p\gamma$.- altura piezométrica (m)

p .- presión (N/m^2)

γ .- peso específico del agua (N/m^3)

α .- corrector de la energía cinética por el uso de la velocidad media en lugar del diagrama de las velocidades reales en la sección de flujo.

A esta expresión (e 4) se la conoce como ecuación de Bernoulli para un líquido ideal, en esta suma interviene la energía potencial y cinética, donde se expresa el principio de conservación de energía.

La energía potencial que ocupa esta sección es constante debido al incremento de z y que en la misma magnitud se dé la disminución p/γ . De esta manera, la energía potencial específica en la sección de flujo puede ser determinada por la cota de la superficie libre, respecto al nivel de referencia. Para las secciones A y B esta energía es, respectivamente, igual a:

$$\begin{aligned} h_A &= \nabla A \\ h_B &= \nabla B \end{aligned} \quad (e 5)$$

De conformidad con la ley de conservación de la energía (ecuación de Bernoulli), la energía e_{AB} , producida en el movimiento el trayecto AB, es igual a la diferencia de las energías en las secciones inicial (A) y final (B) del trayecto:

$$e_{AB} = e_A - e_B \quad (e 6)$$

En el caso $v_1 = v_2$, $\frac{\alpha v^2}{2g} - \frac{\alpha v^2}{2g} = 0$, la energía de flujo en el tramo AB es:

$$e_{AB} = e_A - e_B = h_A - h_B = \nabla A - \nabla B = H_{AB} \quad (e 7)$$

2.4 Principios Hidroenergéticos

Para determinar la energía total del flujo es necesario considerar el volumen total de agua caracterizado por el caudal Q (m^3/s). Asumiendo que durante el intervalo de tiempo t , a través del tramo AB pasa un volumen de agua Qt (m^3), cuyo peso es $Qt\gamma$. En consecuencia, la energía total (J) liberada en el tramo es:

$$E_{AB} = H_{AB}Qt\gamma \quad (e 8)$$

Para cuantificar la tasa de energía liberada, es decir el trabajo empleado (J), se lo realiza transcurrido el tiempo de un segundo (s), valor que corresponde a la potencia P_{AB} , tal dimensión es expresada en vatio(W) correspondiente al sistema internacional de unidades.

$$P_{AB} = \frac{E_{AB}}{t} = H_{AB} Q\gamma \quad (e 9)$$

$$m * \frac{m^3}{s} * \frac{N}{m^3} = \frac{N * m}{s} = \frac{J}{s} = W$$

Debido a que el vatio es una unidad de medida pequeña, es común que, en la práctica, se exprese en sus múltiplos: (kW=1000 W) y megavatio (MW = 1000kW = 10^6W).

Si la potencia P_{AB} se la expresa en kilovatios y al peso específico $\gamma = \rho g$; considerando que la densidad del agua es $\rho = 1000 \text{ kg}/m^3$, y que el trabajo se lo realiza en dirección de la fuerza de gravedad $g=9,81 \text{ m}/s^2$, entonces la expresión sería:

$$P_{AB} = 9,81QH_{AB} \quad (e 9.1)$$

La cantidad de energía es usualmente expresada, principalmente en el sector energético, en unidades de kilovatios-hora. Si el tiempo T es el número de horas de funcionamiento al año, el número de horas equivalentes a 365 días del año es igual a 8760 h, y la cantidad de energía eléctrica se lo expresa en kilovatios-hora. (1 kilovatios hora = $3,6 * 10^6J$), se obtiene:

$$E_{AB} = 85936QH_{AB} \quad Kw - hora \quad (e 10)$$

Para cuantificar la energía, resulta cómodo considerar el volumen de agua V en metros cúbicos $V = Qt$. Reemplazando V en (e 10) y expresando la energía E en kilovatios-hora se llega a:

$$E = \frac{VH}{367,2} \text{ Kw} - \text{ hora} \quad (\text{e } 10.1)$$

2.5 Potencia instalada P_{inst}

La potencia instalada P_{inst} de la central hidroeléctrica, también se denomina potencia útil nominal y es la máxima que puede dar a la central con el máximo caudal turbinado.

Puede ser determinada bajo el mismo procedimiento que fue aplicado para determinar la potencia en una corriente de agua (e 9.1). Sin embargo, no toda esta potencia es transformada en potencia eléctrica útil, ya que son inevitables las pérdidas en su transformación, por ello se introduce el mismo concepto del coeficiente de eficiencia que cuantifica las pérdidas del sistema, la cual se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$P_{inst} = 9,81H_nQ * \eta_t * \eta_g * \eta_{tr} \quad (\text{e } 11)$$

Siendo:

H_n = Salto neto (m)

Q = Caudal regulado (m^3/s)

η_t = Rendimiento de la turbina

η_g = Rendimiento del generador

η_{tr} = Rendimiento del transformador

Los rendimientos de los diferentes elementos varían con el caudal y el salto, y pueden ser obtenidos de los datos de los fabricantes y de los catálogos (Ordoñez, 2015)

Si no se conocen las eficiencias reales de los elementos de la central hidroeléctrica, se puede considerar, para estimación hasta nivel de prefactibilidad, asumiendo un coeficiente sumatorio de eficiencia $\eta = 0,87$, la ecuación nos quedaría de la siguiente manera:

$$P_{inst} = 8,5 QH \quad (e 11.1)$$

Dónde, el coeficiente 8,5 tiene dimensión KN/m^3

2.6 Perdidas de energía

2.6.1 eficiencias η

Para obtener la energía en una planta hidroeléctrica es necesario incluir la eficiencia η a la ecuación de energía en el tramo (e 9.1). En la práctica en condiciones reales, cuando se da esta transformación de energías, se producen perdidas de la conducción hidráulica y pérdidas en el equipo electromecánico.

Pérdidas hidráulicas:

- Fricción entre partículas de agua y las paredes de las tuberías
- Pérdidas en accesorios
- Pérdidas en la obra de toma, etc.

Pérdidas mecánicas:

- Fricción en rodamiento de turbinas
- Pérdida en engranajes
- Fricción en el generador, debido a la potencia, etc.

Pérdidas eléctricas:

- Calentamiento del estator
- Calentamiento en el transformador

- Sistema de transmisión, etc.

Todas estas pérdidas son consideradas por la eficiencia η , que esta desglosada en coeficientes de rendimiento tales como: hidráulico η_H , que corresponde a las pérdidas hidráulicas; de turbina η_T , generador η_G y transformador η_{tr} correspondientes a las perdidas mecánicas y eléctricas (Sanz, 2016).

2.7 Carga Hidráulica

2.7.1 Carga de agua H

La energía que se produce en una central hidroeléctrica es directamente proporcional a la carga o altura de agua generada, esta es equivalente a la distancia vertical que tiene una masa de agua desde un nivel aguas arriba y un nivel aguas abajo.

2.7.2 Carga bruta H_b

Esta carga está dada por la diferencia entre la cota del nivel del embalse y la cota del nivel de la descarga (figura 6). Por lo tanto, es considerado como una función del nivel de agua en el reservorio, dependiendo respectivamente del almacenamiento de agua en el embalse (Hernández, 2010).

$$H_b = \nabla NAAR - \nabla NAAB \quad (e 12)$$

Siendo:

$\nabla NAAR$: Nivel aguas arriba (m)

$\nabla NAAB$: Nivel aguas abajo (m)

2.7.3 Carga Neta H_n

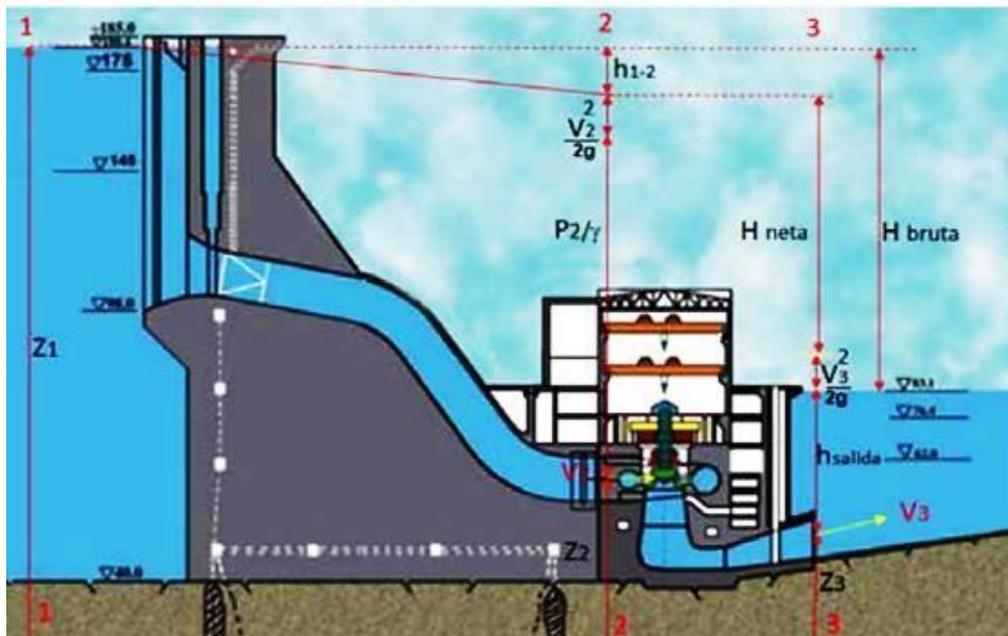
Como se ha mencionado existen pérdidas hidráulicas, que se las pueden calcular en base a fórmulas de la ingeniería como tal, esta carga neta se la obtiene del producto entre la carga bruta y

el coeficiente de pérdidas hidráulicas, obteniendo así una carga real que es empleada para el cálculo de la potencia.

$$H_n = \eta_H * H_b \quad (e 13)$$

Figura 6

Esquema de energía en una central hidroeléctrica



Nota: Sección de una hidroeléctrica con líneas de energía, considerando las pérdidas de energía en el agua. (H_{1-2})- Pérdidas hidráulicas. Fuente: Sandoval (2018).

2.8 Energía hidráulica

2.8.1 *Energía firme*

Es la energía suministrada por una central hidroeléctrica de manera permanente, todo el día, es decir las 24 h del día, garantiza el continuo servicio del sistema y satisface la demanda eléctrica en el instante que se lo requiera.

2.8.2 *Energía secundaria*

Esta energía es generada a partir de un adicional en el embalse, es decir si hubiese una carga extra a la carga normal del embalse en la central hidroeléctrica.

2.8.3 *Energía total*

Es la sumatoria de la energía firme y la energía secundaria, es la máxima energía generada en una central hidroeléctrica.

2.8.4 *Factor de planta*

El factor de planta es una medida de la eficiencia del sistema eléctrico de una zona, país o región determinada.

El factor de planta es un indicador adimensional que define la razón entre la energía generada y la energía que habría generado a capacidad nominal, registrados dentro de un periodo de estudio. Esta relación puede ser bastante baja, del orden de 0,25 o menos, lo que significa que la central hidroeléctrica en un promedio del 75% de los casos no utiliza toda su capacidad instalada. (García, 2014).

$$\alpha = \frac{P}{P_{nom}} = \frac{E_{gen}}{P_{nom} \cdot t} \quad (e 14)$$

Donde:

α : Factor de planta

E_{gen} : Energía generada durante el periodo de estudio

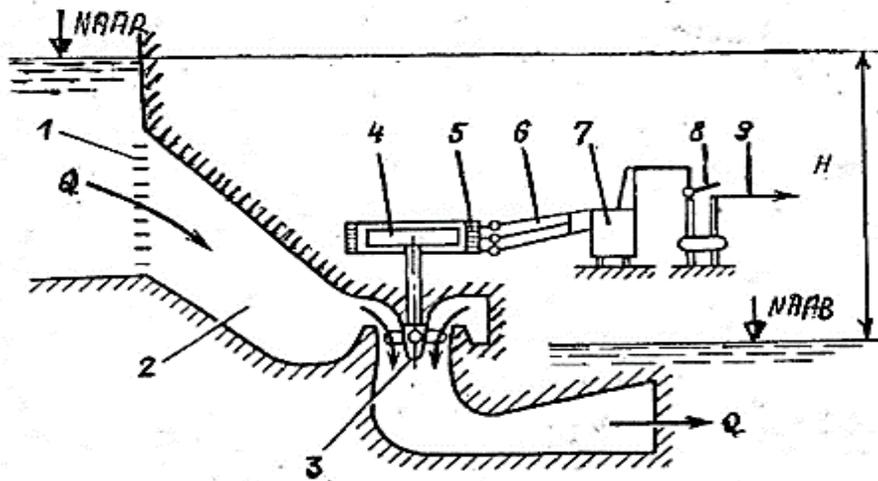
P_{nom} : Potencia nominal registrada en el periodo de estudio

2.9 Centrales hidroeléctricas

Una de las formas de aprovechar la energía disponible en los ríos, es mediante la implantación de construcciones; como lo son las centrales hidroeléctricas; que son instalaciones con el propósito de aprovechar la energía hidráulica y transformarla en energía eléctrica. El agua acumulada en el embalse es transportada a través de una tubería forzada dirigida a la turbina, esta ingresa a presión a la cámara del rodete, golpea los álabes y lo hace girar. Consecuentemente, la energía potencial de presión y parte de la energía cinética del agua, se transforman en energía mecánica de rotación que al pasar por el generador se convierte en energía eléctrica (figura 7). Esta energía se transmite a través de los conductos a los transformadores desde los cuales se entrega al elemento distribuidor y, con alto voltaje, a través de las líneas de transmisión se evacua la electricidad producida a los consumidores.

Figura 7

Esquema tecnológico de una central hidroeléctrica



Nota. NAAR (nivel aguas arriba). 1, Obra de toma; 2, Tubería forzada; 3, Turbina; 4, Generador; 5, Estator; 6, Conductos; 7, Transformadores; 8, Distribuidor; 9, Líneas de transmisión; NAAB (nivel aguas abajo). Fuente: Calero (2021).

2.9.1 Clasificación de las centrales hidroeléctricas

2.9.1.1 Clasificación según su régimen de flujo

Estas instalaciones las podemos clasificar en 3 según el tipo de utilización del agua:

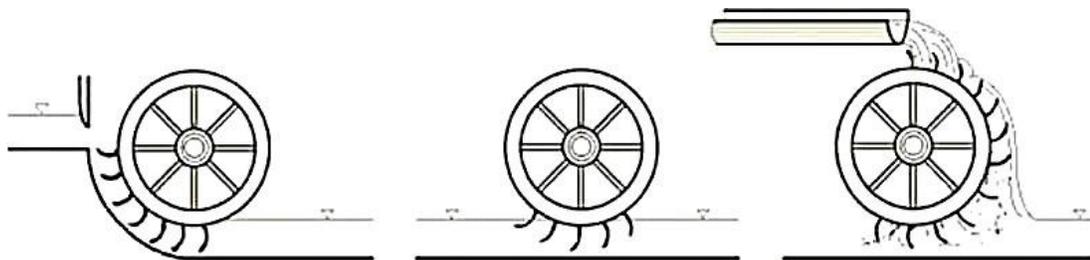
2.9.1.1.1 Centrales de agua fluyente, por derivación o de pasada:

En esta se utiliza el caudal de un río, que ingresa por la toma de agua a través de un túnel o mediante un canal de derivación permitiendo el ingreso de agua a presión y así conseguir mover la turbina y generar energía que se inyecta directo a la red.

Si se observa en la figura 8, en la primera imagen el caudal del río se deriva, y llega a la turbina mediante una pequeña caída del agua, que con su propio fluir al pasar por la turbina provoca su movimiento. En la segunda imagen se observa, que solo el paso del agua o fluyente provoca que la turbina se mueva.

Figura 8

Ruedas hidráulicas



Nota: Diferencias entre los movimientos de la turbina dependiendo del tipo de central hidroeléctrica. Fuente: Sánchez (2019).

2.9.1.1.2 Centrales de Embalse

En un tramo de río se construye una presa y se retiene el agua hasta una cierta altura, que se conoce como embalse, esta utiliza la energía potencial generada por el agua acumulada, el agua

ingresa por una tubería forzada que al caer se transforma en energía cinética y acciona la turbina que a su vez pasa a un generador eléctrico y produce electricidad.

La altura generada de manera artificial produjo la caída del agua, que hizo mover a la turbina, se puede observar esto en la figura 8 en la tercera imagen.

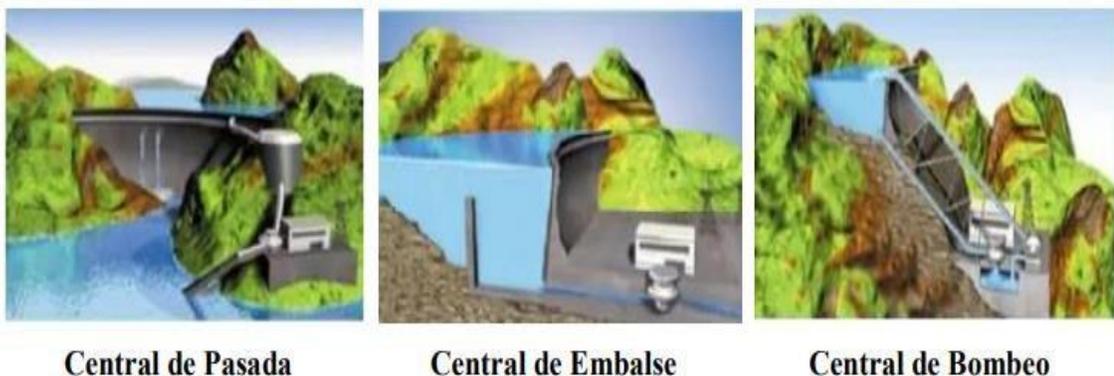
2.9.1.1.3 Centrales de bombeo o reversibles

La central almacena agua en dos embalses a distintos niveles, se toma agua de la parte de abajo de un embalse secundario y se la sube hacia un embalse primario, el proceso se lo realiza mediante la turbina, haciéndola girar al revés, dándole una función de bomba de succión, posteriormente se deja caer el agua nuevamente, haciendo que la central trabaje de manera convencional y pueda generar energía eléctrica.

El propósito de esto es generar energía barata que se consume al subir el agua del embalse inferior al superior en la noche, y en la mañana el agua almacenada en el embalse de arriba caiga generando energía cara, el incremento o decremento de precio varía según el instante del día.

Figura 9

Clasificación general de las centrales hidroeléctricas.



Nota. Las centrales hidroeléctricas constan de depósitos de agua que pueden ser de pasada, embalsada o bombeada. Fuente: Ramírez (2022)

En la práctica, también existen centrales mixtas, adoptando la clasificación del tipo predominante. Ejemplo: C.H. Coca Codo Sinclair 1500MW es una central de pasada, pero cuenta con un pequeño embalse de regulación diario para generar durante las horas pico o de mayor demanda energía eléctrica (MERNR, 2018)

2.9.1.2 Clasificación administrativa

Desde el punto de vista administrativo, esta clasificación está en función de su potencia instalada, con lo cual se las diferencia por su aprovechamiento hidroeléctrico y por su tamaño. En el Ecuador el Consejo Nacional de Electricidad CONELEC, adopta la clasificación que se puede observar en la tabla 1.

Tabla 1

Clasificación de Hidroeléctricas por rangos de potencia según CONELEC.

Potencia	Clasificación
≥ 50 MW	Grande Hidroeléctrica
10 – 49,99 MW	Mediana Hidroeléctrica
– 9,99 MW	Pequeña Hidroeléctrica
100 – 999,99 kW	Mini Hidroeléctrica
5 – 99,9 kW	Micro Hidroeléctrica
< 5 kW	Pico Hidroeléctrica

Nota. Clasificado acorde al Plan Maestro de Electrificación 2009 – 2020, y el inventario de recursos energéticos 2015. Fuente: ARCONEL (2015).

Otra forma de clasificar a una central hidroeléctrica va a depender de su altura de salto o desnivel en cuenta a la caída de agua como son: Centrales con saltos bajos, medios y elevados, propuesta por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), de igual forma en función de su tamaño esta se clasifica en: Micro, Mini y Pequeñas centrales hidroeléctricas (Tabla 2).

Tabla 2*Clasificación de Hidroeléctricas por rangos de Potencia y Saltos según OLADE*

Hidroeléctricas	Potencia (kW)	Salto (m)		
		Bajo	Medio	Elevado
Microcentrales	Hasta 50	< 15	15 – 50	> 50
Minicentrales	50 – 500	< 20	20 – 100	> 100
Pequeñas centrales	500 - 5000	< 25	25 – 130	> 130

Nota. Clasificación según OLADE. Fuente: OLADE (1980).

En el Ecuador, hasta el mes de diciembre del 2018, el parque generador disponible, para la obtención de electricidad consta de 317 centrales (tabla 3), las cuales suman en total una potencia efectiva de 8.183 MW.

Tabla 3*Potencia total efectiva y número de centrales del Ecuador*

Sistema	Número de centrales	Potencia efectiva
Sistema Nacional Interconectado (S. N. I.)	133	7177
Sistemas No Incorporados	184	1006
Total	317	8183

Nota. Los sistemas no incorporados, se componen de aquellos sistemas que no están conectados al Sistema nacional Interconectado, están aisladas centrales de las Galápagos y las petroleras. Fuente: MERNNR (2018).

2.9.2 Partes de una central hidroeléctrica con embalses de regulación

2.9.2.1 Embalses

Un embalse se forma con la ayuda de la implantación de una estructura artificial (presa) construida principalmente de hormigón, que limita todo o parte del perímetro de una cuenca, provocando que el agua se acumule en grandes volúmenes, dependiendo de la altura de la presa, el nivel de agua llega hasta una cierta cota, que permite que el agua caiga y debido a esta diferencia de niveles se aproveche de mejor manera el recurso hídrico.

Dependiendo de las características físicas del valle, el volumen de agua queda retenido en un vaso topográfico, que hace que el nivel de agua sea mucho mayor al nivel del río. Al ocupar áreas densamente grandes de inundación, esto puede dañar zonas fértiles, perjudicando la agricultura de una población y de igual manera alterar el ecosistema acuático en ríos. Se debe realizar un estudio de impacto ambiental y evaluar así la posibilidad de este tipo de construcciones.

La finalidad de los embalses es regular el caudal del río, haciendo que éste almacene la mayor cantidad de agua durante épocas de invierno, que luego son utilizadas en épocas secas para el riego, abastecimiento de agua y la producción de electricidad mediante una energía limpia, sin causar emisión de gases tóxicos o cualquier tipo de lluvia ácida (Guevara, 2000)

La mayoría de las normas en cuanto a seguridad, indican embalses con un valor igual a $100\ 000\ m^3$, cuando se trata de grandes volúmenes, cada país según su realidad continúa con la construcción de estas obras, por lo que clasificarlas sería de carácter temporal, pero para fines académicos a continuación se presenta la tabla 4, que presenta una categorización de embalses, según su tamaño propuesto por Zhelezniakov (1984).

Tabla 4*Clasificación de los embalses*

Categoría	Volumen (hm³)	Área (km²)
Micro	< 1	< 1
Mini	1 a 10	1 a 2
Pequeño	10 a 100	2 a 20
Mediano	100 a 1000	20 a 100
Grande	1000 a 10 000	100 a 500
Muy grande	10 000 a 50 000	500 a 5000
Mega	> 50 000	> 5000

Nota. Clasificación en base a su volumen y área de superficie de inundación. Fuente: Sandoval (2018).

2.9.2.1.1 *Características de los embalses*

Las principales características de los embalses son las curvas área-elevación, la curva capacidad-elevación y el caudal regularizado.

a. Curva área-elevación o cota-superficie:

Se construye a partir de un levantamiento topográfico, dicha información sirve para realizar la planimetría del área comprendida entre cada curva de nivel del vaso. De acuerdo con la magnitud del proyecto y a estudios realizados, la equidistancia entre cada curva de nivel definidas a escala puede ser de uno a cinco metros. Dependiendo del tamaño del embalse y el eje de cierre de la presa, se determina el valor de la superficie del área (Ω) inundada correspondiente a cada cota (Figura 10).

b. *Curva capacidad-elevación o cota-volumen:*

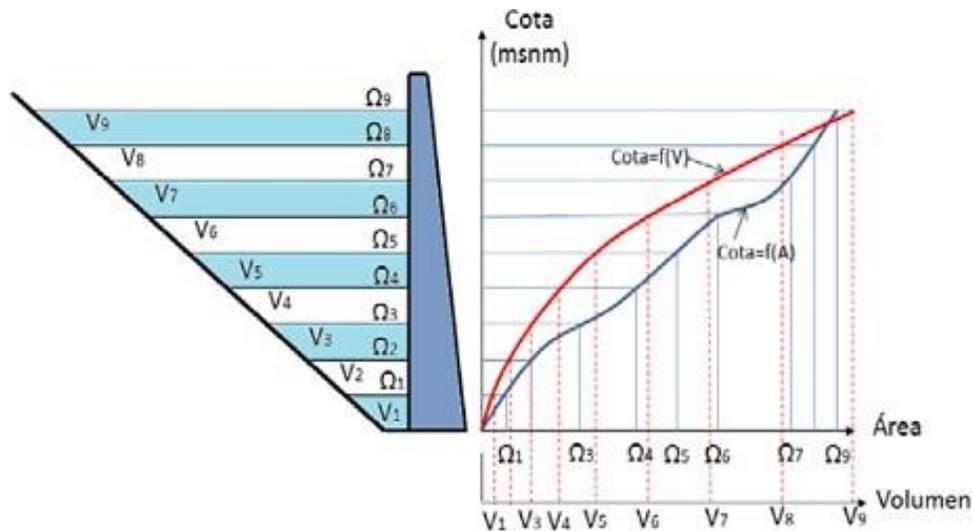
Se obtiene mediante la integración de la curva área-elevación. Esta expone el volumen almacenado correspondiente a cada elevación (Vargas, 2020).

Para calcular el primer volumen, se considera que la sección de un área corresponde a un paraboloides, con la siguiente ecuación.

$$V1 = \frac{2}{3} \Omega_1 \Delta H \quad (e 15)$$

Figura 10

Construcción de las curvas Cota-Área-Volumen de un embalse.



Nota. Representación de las curvas de embalse en un plano cartesiano, en el eje X, área del espejo de agua y volumen; en el eje Y los niveles correspondientes al vaso. Fuente: Sandoval (2018).

Para el cálculo de los siguientes volúmenes, es necesario realizar la semisuma de las áreas y esto multiplicar por la altura correspondiente, de cada franja de espejo de agua, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$V1 = \frac{n_1+n_2}{2} \Omega_1 \Delta H \quad (e 16)$$

Cada valor obtenido se lo gráfica en un sistema de coordenadas cartesianas, como se muestra en la figura 10. Al dibujar se los puede presentar en un mismo gráfico o realizarlos de manera separada.

c) Caudal regulado (Q_R)

Es el caudal que pasa a través de las turbinas de la central hidroeléctrica. En la curva de descarga, la variación de este, caudal produce la variación del nivel aguas abajo en el proceso de operación.

2.9.2.1.2 Niveles de Embalse

La acumulación de agua en el vaso permite la aparición de diferentes niveles de agua (figura 11) que, en condiciones de operación del embalse, cada uno de estos cumplen con una función que los caracteriza. Se mencionan a continuación en orden creciente los niveles más representativos.

- **Nivel de desplante (ND).** Este nivel corresponde al desplante de la cimentación, es decir, que se ubica entre la superficie de contacto de la estructura y el suelo.
- **Nivel Muerto de embalse (NME):** Es el nivel mínimo de espejo de agua en el embalse, se ubica por debajo de la obra de toma. En este nivel las estructuras asociadas a la presa no operan o, si operan lo hacen de manera no adecuada.
- **Nivel Mínimo de Operación de Embalse (NMOE):** Es el nivel más bajo que garantiza la operación de la presa en circunstancias normales. En este nivel empieza a trabajar la obra de toma, llevando el agua hacia las turbinas.
- **Nivel Normal de Embalse (NNE):** Es el nivel máximo que alcanza el espejo de agua en condiciones normales de operación del embalse, es decir, es el nivel que garantiza el abastecimiento de energía eléctrica.

- **Nivel Forzado de embalse (NFE):** Es el nivel máximo extraordinario, dadas condiciones hidrológicas extremas como, caudales excedentes a causa de crecidas en los ríos, lo que conlleva que el volumen de agua esté por encima del nivel normal de embalse. La prioridad aquí es garantizar la seguridad de la presa, por ello aquí empiezan a trabajar los vertederos de excesos o estructuras de descarga.

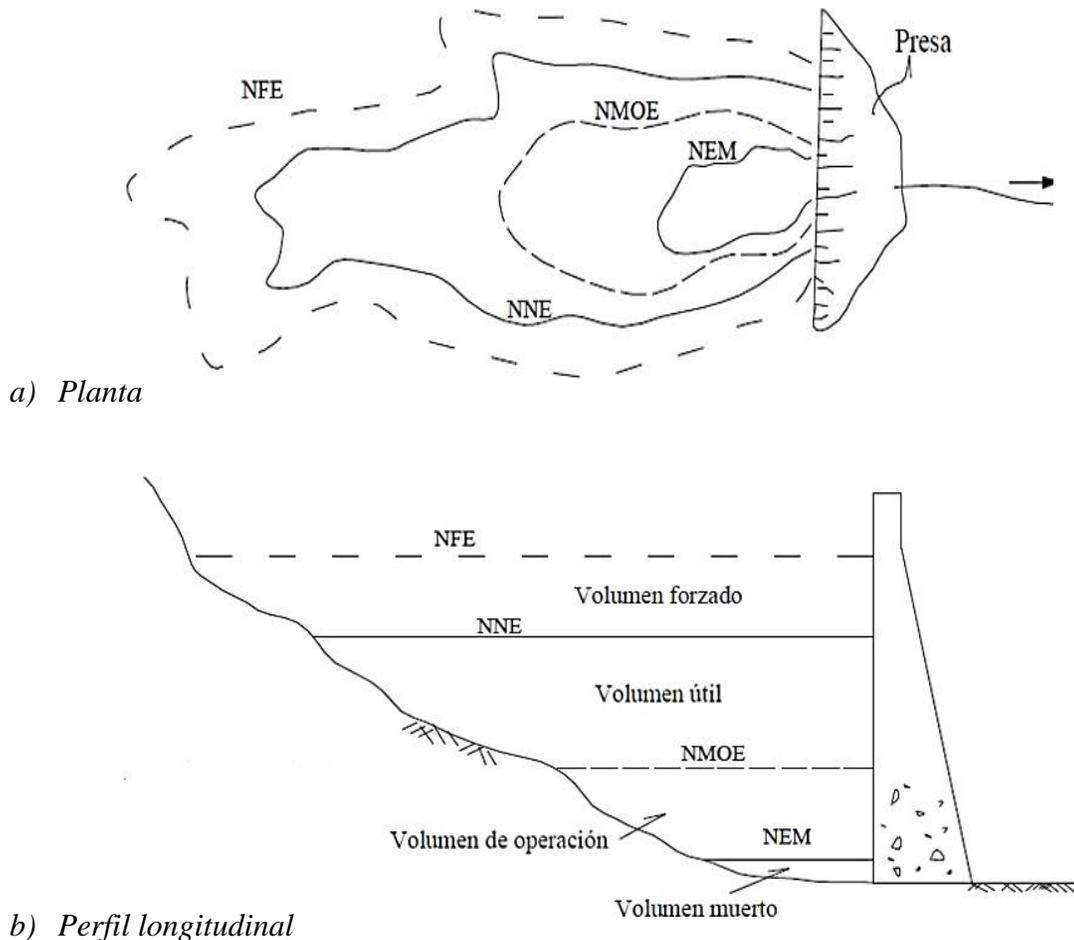
2.9.2.1.3 Volúmenes de embalse

Los volúmenes de embalse están asociados a sus niveles característicos (figura 11), y son denominados de acuerdo con su función, de esta forma se tiene:

- **Volumen muerto de embalse (VME):** Volumen donde se retiene o almacena los sedimentos que son transportados por el río durante toda la vida útil del proyecto. Se encuentra entre la superficie inferior del cauce y el nivel por debajo de las obras de descarga (NME). Este volumen no puede ser aprovechado para la generación eléctrica.
- **Volumen útil de embalse (VUE):** Es el volumen de operación del sistema, utilizado para satisfacer las necesidades de consumo y el cumplimiento de los objetivos energéticos. Se lo estima mediante un estudio técnico- económico. Se ubica entre los niveles NNE Y NME.
- **Volumen forzado de embalse (VFE):** Es el volumen de retención de agua, acumulada temporalmente. Se forma a partir de la consecuencia de una avenida, por lo cual es recomendable que esta lámina de agua tenga un tirante igual a 3m, este valor puede variar dependiendo de la magnitud del proyecto. Se encuentra ubicado entre los niveles NFE y NNE.

Figura 11

Representación de los niveles característicos de un embalse.



Nota. Niveles y volúmenes de agua en un embalse presentadas en: a) planta, b) perfil longitudinal. Fuente: Córdoba (2015)

2.9.3 Vertedero hidráulico o aliviadero

Son estructuras que sirven para descargar el caudal excedente que en el embalse no pueda contener. Cuando una represa no puede contener suficiente volumen esta estructura sirve como seguridad para descargar excedentes y evitar daños en la represa. Los vertederos se construyen con un material que no se erosione y sea resistente. No todos los vertederos pueden estar integrados en

la presa, en dicho caso están a un lado. En el caso de presas de tierra, el vertedero se debería ubicar en un valle adyacente a la presa para su descarga y en el caso de presas de concreto, los vertederos forman parte de la estructura de la presa.

Estos vertederos pueden ser controlados por compuertas o de descarga libre.

2.9.3.1 Vertedero controlado por compuertas

Estas compuertas son equipos mecánicos que ayudan con el control del flujo de agua, permitiendo medir el caudal que pasa a través de las estructuras hidráulicas y a la vez regula la descarga que se produce.

2.9.3.2 Vertederos de descarga libre

Son vertederos en donde no se puede controlar el caudal vertido. Es fundamental el estudio de un caudal de diseño, debido a que, si un vertedero descarga un caudal mayor al de diseño, corre el riesgo de que falle causando un gasto económico excesivo.

2.9.4 *Obra de toma*

La obra de toma o también conocida como de captación tiene como objetivo la extracción del agua embalsada de manera regulada y controlada con el fin de satisfacer necesidades tales como la generación de energía eléctrica y el abastecimiento urbano. La estructura de toma está ubicada en el fondo del embalse, en la cota mínima útil del embalse.

2.9.5 *Tubería forzada*

Es una tubería de acero, enterrada a lo largo de la presa que recibe el agua desde la obra de toma y es llevada a presión a través de la presa, conduciendo el agua hacia la turbina ubicada en la central.

2.9.6 Turbinas

La turbina hidráulica es un motor que aprovecha la energía del agua en movimiento y la transforma a energía mecánica de rotación. La caída del agua a través de la turbina hace que ésta gire y su eje al estar acoplado a un generador hace que este produzca energía eléctrica.

El eje de giro de las turbinas puede ser horizontal, vertical o inclinado según la dirección en la que entra el agua pueden ser:

- *Turbinas radiales*: El ingreso del agua al rodete es de forma radial, de tal manera que el fluido circula alrededor del eje de la turbina
- *Turbinas axiales*: El flujo de agua ingresa y sale paralela al eje de rotación de la turbina
- *Turbinas tangenciales*: El flujo de agua es transversal, golpea al rodete en su periferia.

2.9.6.1 Tipos de turbinas hidráulicas

Se clasifican en turbinas de acción y reacción

- *Turbinas de reacción*

Las turbinas Kaplan y Francis son de reacción (figura 12), el agua ingresa a la cámara del rodete de manera radial, en dónde el rodete consta de un disco con una serie de canales formados por álabes, que son golpeados por el agua para hacerlos girar (efecto de reacción), como resultado el flujo pierde parcialmente su velocidad y la presión hidrostática que ejerce el agua se transforma en energía mecánica de rotación (Ortiz, 2011).

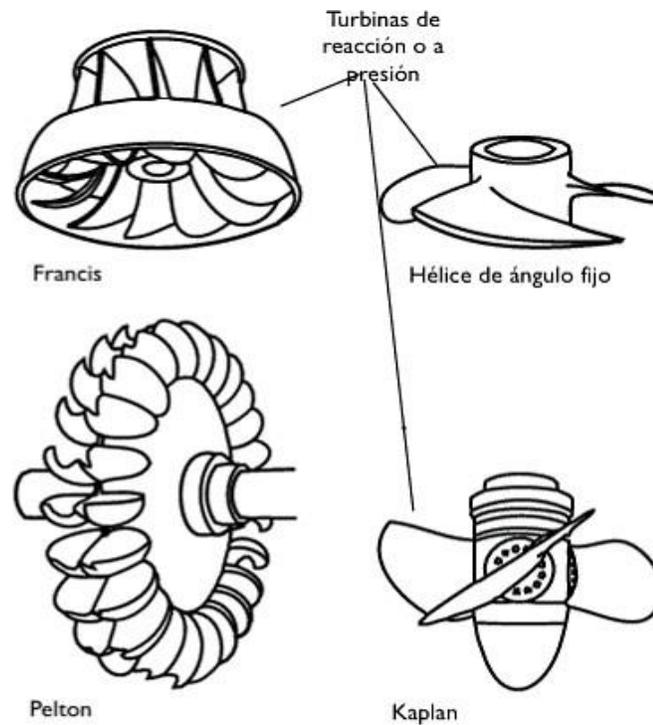
- *Turbinas de acción*

De manera distinta funciona un modelo Pelton (figura 12), definida como turbina de acción, sus álabes son en forma de cucharón. El chorro de agua es lanzado a gran velocidad desde el inyector hacia la atmósfera, este se lo hace incidir en la arista central de los cucharones dividiendo

al chorro en dos partes que salen despedidas tangencialmente, este cambio de dirección hace que el rodete gire y la energía cinética del agua se transforme en energía mecánica de rotación.

Figura 12

Diferentes tipos de rotor de turbinas



Nota. Formas de rotores, pueden variar su diámetro desde 30 centímetros hasta

7 metros. Fuente: González (2012)

2.9.7 Generador y transformador

Un elemento indispensable que posee la central hidroeléctrica es el generador, capaz de transformar la energía mecánica de rotación en energía eléctrica, esta electricidad recibe el transformador que puede elevar o disminuir la intensidad del nivel de voltaje, asegurando este sea apto para uso industrial, comercial o doméstico.

2.9.8 *Líneas eléctricas*

Las líneas eléctricas son una red de transporte, que se utiliza para la transmisión de la electricidad a grandes distancias que llegan a distintos puntos de consumo.

2.9.9 *Canal de descarga*

Para finalizar el agua utilizada para la generación de energía es devuelta al río aguas abajo mediante un canal de descarga.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En este capítulo se expone a detalle los métodos de investigación, factores considerados para la recolección de información y los procedimientos empleados para alcanzar los objetivos propuestos. El proceso de análisis se llevará a cabo en el Proyecto Hidroeléctrico Santiago, que incluye una compilación de datos del estudio a nivel de factibilidad.

3.1 Hidrología

3.1.1 Descripción de la cuenca hidrográfica

El sistema hidrográfico del País se define en dos vertientes por la cordillera de los Andes, i) la vertiente occidental que son los ríos de la región costa y sierra que desembocan al océano Pacífico y ii) la vertiente oriental que son los ríos de la región sierra y amazónica, que desembocan en el río Amazonas” (Araque, 2019, p 25).

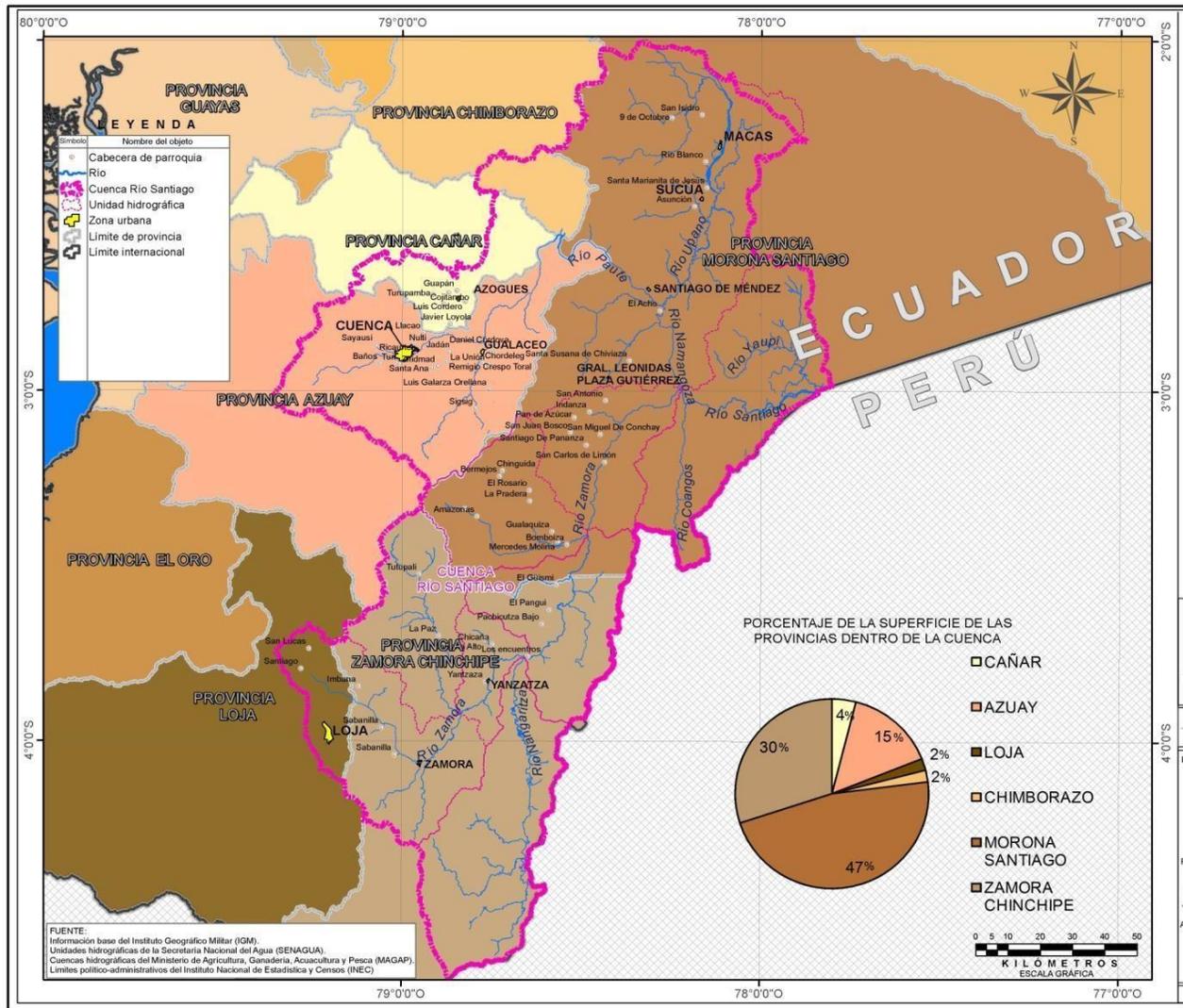
La disponibilidad promedio anual de agua en el Ecuador es de 241 048,61 hm^3 . En la cuenca del Pacífico la disponibilidad del recurso hídrico es de 68 262,25; y, los restantes 172 786,36 le corresponden a la cuenca del Amazonas (CELEC-EP, 2011).

El río Santiago pertenece a la cuenca del Amazonas, ubicada en la región suroriental del Ecuador, esta cuenca está conformada por las provincias: Morona Santiago(47%), Zamora Chinchipe (30%), Azuay(15%), Cañar (4%), Chimborazo(2%) y Loja (2%), (CELEC-EP, 2011). Su extensión se puede observar en la figura 13 y cubre un área total de 24 937 km^2 dentro del país.

La cuenca Santiago limita al norte, con las cuencas de los ríos Pastaza y Guayas, al noroeste con la cuenca del río Morona, al sur con la cuenca del río Mayo, al oeste delimita con las cuencas de los ríos Cañar, Balao, Gala, Jubones, al suroeste con la cuenca del río Chira y en la parte este con el límite internacional del Perú.

Figura 13

Localización de la cuenca río Santiago



Nota. Extensión y delimitación de la cuenca del río Santiago. Fuente: CELEC EP (2011).

El río Santiago nace de la unión de los ríos Namangoza y Zamora, el primero recibe las aguas del río Paute y el río Upano, y el segundo se forma en la provincia de Loja y sus principales afluentes son los ríos Nangaritza, Yacuambi y Bomboiza. El río Santiago es afluente directo del río Marañón perteneciente a la cuenca alta del río Amazonas, el cual recorre buena parte de los territorios amazónicos de Ecuador y de Perú. . (CELEC-EP, 2016)

Las condiciones climatológicas de la cuenca son bastante variables, desde el clima ecuatorial frío de alta montaña en las grandes alturas, clima frío de los páramos, templado y subtropical y tropical húmedo en las llanuras de nivel más bajo

3.1.2 *Serie hidrológica de caudales medios mensuales del sitio G8*

Para este estudio se utiliza la información de un registro de caudales medios mensuales de escurrimiento tomados desde el año 1984 hasta el 2012 en el sitio del proyecto hidroeléctrica Santiago. El caudal medio anual (Q_m) es de $1385 \text{ m}^3/\text{s}$

3.1.3 *Curvas Elevaciones– Áreas– Capacidades*

La topografía y cartografía existente disponible para la zona donde se encuentra el proyecto Santiago presentaba incertidumbres y variaciones significativas, con este antecedente los técnicos de CELEC EP y de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) hicieron una actualización de la topografía de la zona, dando paso a la utilización de la metodología LIDAR (Light Detection and Ranging), cuya traducción literal sería “detección y medición a través de la luz”.

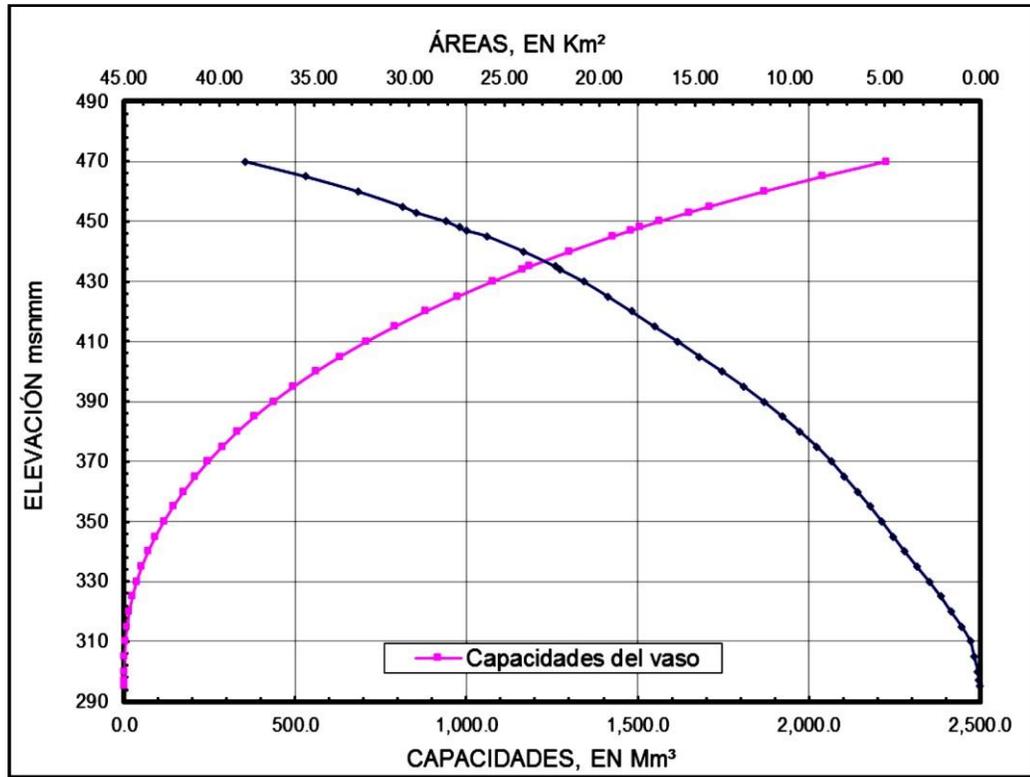
Los sistemas LIDAR permiten determinar la distancia mediante un emisor de láser al emitir pulsos de luz que se reflejan en el terreno, registrando datos de posición (x, y) y de elevación (z). Esta tecnología es utilizada para la recolección de datos de elevación que sirven para definir la superficie del terreno.

Los datos cuentan con una mayor densidad, que en combinación con sistemas GNSS de alta precisión y sistemas inerciales (IMU) constituyen un sistema de mayor alcance, permitiendo detectar incluso objetos bajo cobertura vegetal (Ochoa, 2013).

A partir de la información recabada de la topografía realizada mediante el sistema LIDAR con escala 1:5000, CFE construyó las curvas elevación-área-volumen del embalse (Figura 14).

Figura 14

Curvas Elevación-Área- Capacidad



Nota. Capacidad de almacenamiento de agua en el vaso. Fuente: CELEC EP-CFE(2016).

3.1.3.1 Análisis de los niveles característicos de embalse

Este proyecto abarcaría un área inundable de aproximadamente 3000 ha y un volumen de 1649 millones de m³ al Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NFE) en la cota 453,00 msnm. La longitud del embalse es de 24 km sobre el brazo del río Zamora y 45 km sobre el del río Namangoza.(Figura 15).

La cota máxima del embalse del proyecto, correspondiente al NFE, se restringió en función de la elevación del poblado de Santiago de Méndez, con el objeto de evitar al máximo su afectación, y en función de las condiciones geológicas de la boquilla en ambas márgenes del río, evitando los paquetes de rocas calcáreas susceptibles a disolución cársica.

Figura 15

Vista en planta de la formación de embalse en el sitio PH Santiago



Nota. Desembocadura de los ríos Zamora y Namangoza hacia el río Santiago.

Fuente: CELEC EP (2011).

Otro aspecto que se toma en cuenta, en el análisis en cuanto a los niveles de embalse, es el aporte de sedimentos que se tiene en el sitio. El resultado de transporte de sedimento total muestra un transporte de $0,296 \text{ m}^3/\text{s}$, los cuales representan aproximadamente $9,34 \text{ hm}^3/\text{año}$, con ello se condiciona al nivel mínimo de operación (NMOE) a que este tenga la suficiente capacidad de retener los sedimentos, de la zona del río Zamora y el río Namangoza que tienen en común la desembocadura en el río Santiago.

Considerando tanto la topografía, como los antecedentes anteriormente mencionados, se han definido los siguientes niveles en el embalse.

Tabla 5

Niveles característicos de embalse del Proyecto Santiago.

	Cota(msnm)	Área (km²)	Capacidad (hm³)
CORONA	455	30,37	1709,9
NFE	453	29,65	1649,9
NNE	448	27,37	1507,14
NNMO	434	22,08	1162,57
CIMENTACIÓN	296		

Nota. Presa(Elevaciones-áreas-capacidades). Fuente: CELEC-EP (2016)

El nivel máximo de operación (NNE) se encuentra en la cota 448 msnm, nivel que se ha fijado principalmente en función de los riesgos por crecidas máximas y el nivel mínimo de operación (NMOE) en el cual se ha tomado en cuenta, criterios de seguridad de la obra de toma y en base a los azolves por sedimentos, ubicado en la cota 434 msnm. De esta manera se puede determinar la capacidad útil del embalse.

$$V. \text{NNE} - V. \text{NMOE} = \text{VUE} \quad (\text{e } 17)$$

$$1507,14 \text{ Hm}^3 - 1162,57 \text{ Hm}^3 = 344,57 \text{ Hm}^3$$

3.1.4 Curva de descarga

Esta curva también llamada curva de calibración de caudales posee una tendencia típica de tipo exponencial que refleja el comportamiento de cauces naturales. Con esta ecuación se conoce la descarga de río aguas abajo en condiciones naturales (Figura 16), en el tramo de ubicación de la presa.

$$Q = a * (h - h_o)^b \quad (e 18)$$

De donde:

Q .- Caudal de descarga (m^3/s)

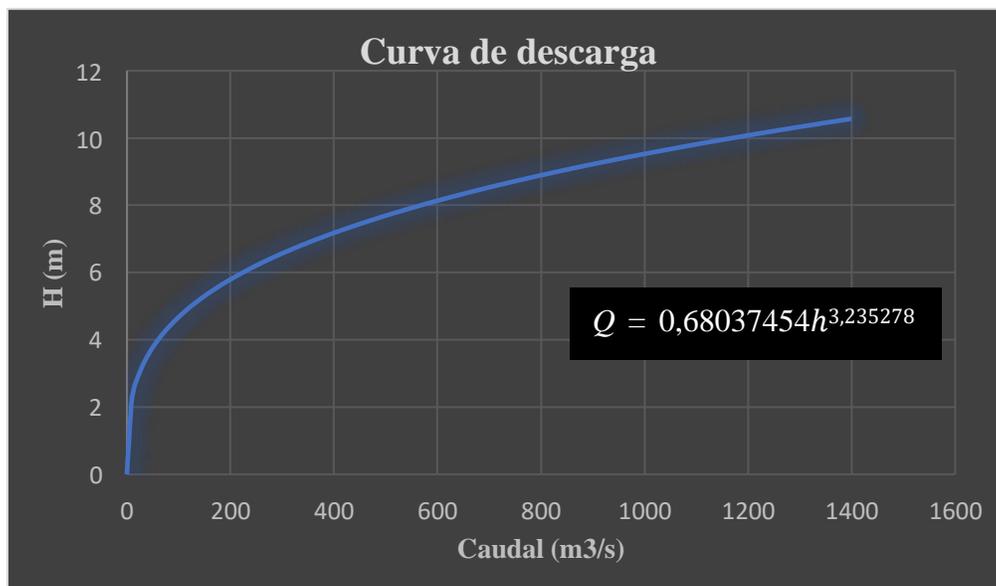
a y b .- son parámetros de ajuste

h_o .- nivel al cual el caudal es cero

h .- nivel del agua (m)

Figura 16

Grafica de la curva de descarga de la cuenca del río Santiago



Nota. Para saber el incremento de agua, se toma la derivada con respecto a h ($\frac{dQ}{dh}$).

Para el estudio en la cuenca Santiago, se tienen la siguiente ecuación:

$$Q = 0,68037454h^{3,235278} \quad (e 18.1)$$

Donde a partir de un tirante (h) se obtiene el caudal de descarga (Q), la relación se puede apreciar en la figura 16

3.2 Procesos técnicos para cálculos hidro energéticos

3.2.1 *Proceso técnico para determinación de Potencia y Energía.*

La potencia que se obtiene de un aprovechamiento hidroeléctrico es proporcional a las siguientes variables: caudal utilizado, carga generada, coeficientes de eficiencia en máquinas y el peso específico del agua.

De la ecuación (e 11) se desglosa la siguiente ecuación (e 11.1), considerando que el coeficiente sumatorio de eficiencia es igual a $\eta = 0,87$

$$P(kW) = \gamma * \eta * Q * H$$

$$P(kW) = 8,5 QH \quad (e 11.1)$$

Si la fórmula de potencia es integrada en el tiempo, el resultado es la energía en ese período. En este estudio se utiliza caudales medios diarios a partir de la información de los datos medios mensuales, con lo cual se puede obtener la energía y carga media para cada día del año.

$$E(kWh) = \sum_{i=1}^{24} P_{(i)} \quad (e 19)$$

$$E(kWh) = 8,5 \sum_{i=1}^{24} Q_{(i)} * H_{(i)}$$

Se procede con los siguientes cálculos, basados en la (e 14).

$$\alpha = \frac{P_G}{P_T}$$

$$P_T = \frac{\alpha}{P_T} \quad (e 14.1)$$

De donde:

P_G .- Potencia Garantizada

P_T .- Potencia total máxima

Para el cálculo de la potencia secundaria, basta con restar de la potencia total máxima o instalada la potencia garantizada.

$$P_T = P_G + P_S \quad (e 20)$$

$$P_S = P_T - P_G \quad (e 20.1)$$

De donde:

P_S .- Potencia secundaria

3.2.2 *Proceso técnico para determinación de niveles y volúmenes en el embalse*

Se asume a continuación que todo el caudal regulado Q_R pasa a través de las turbinas de la central hidroeléctrica. “La variación del caudal Q_R en el proceso de operación produce la variación del nivel aguas abajo, en tanto que, la variación del volumen residual de agua en el embalse determina la variación del nivel aguas arriba. De esta manera, como resultado de la regulación se modifica la carga. Para determinar la potencia, con los valores de Q_R y V_{RES} , es necesario determinar: El nivel aguas abajo $\nabla NAAB$ en función de Q_R , utilizando la curva de descarga; el nivel aguas arriba $\nabla NAAR$, en función de V_{RES} , utilizando la curva de volúmenes de agua y la carga H que representa los niveles de agua aguas arriba y aguas abajo de la presa, respectivamente, por $\nabla NAAR$ y $\nabla NAAB$ ” (Calero, 2021, p. 11).

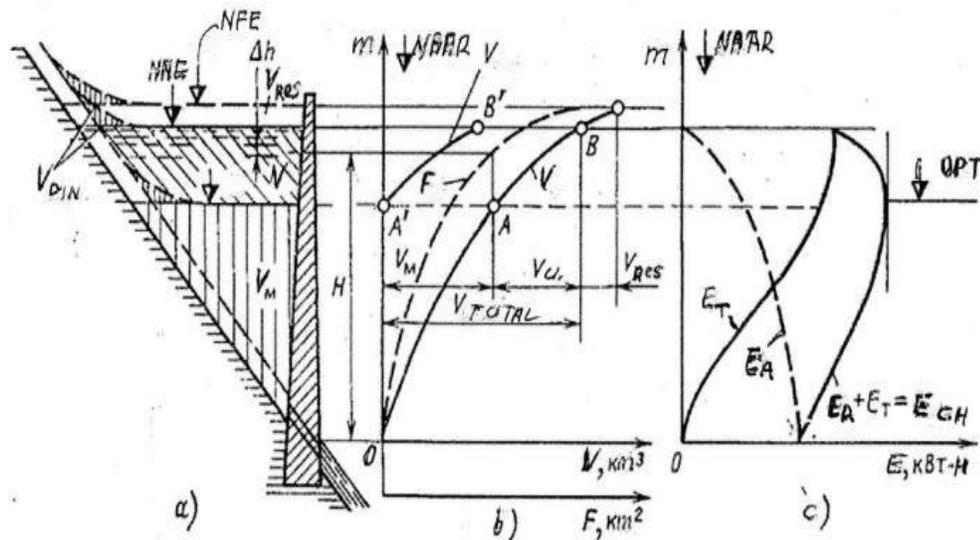
Para determinar el nivel agua abajo se calculó el calado h a partir del caudal de la curva de descarga, de la ecuación (e 18.1) y el nivel aguas abajo será igual a la suma de la cota de cimentación (N.C) más el calado.

$$\nabla_{\text{NAAB}} = \text{N.C} + h \quad (\text{e 21})$$

El nivel aguas arriba es determinado debido a la ubicación del volumen residual V_{RES} . “Conocido el NMOE, para los cálculos de operación del embalse, resulta cómodo utilizar, no precisamente la curva completa de volúmenes, sino, la curva residual del volumen útil $V_{\text{RES}} = f(\nabla_{\text{NAAR}})$. Esta curva, representada en la figura 17, b como $A'B'$ corresponde al tramo AB de la curva de volúmenes, desplazada hacia el eje vertical de los niveles, considerando que V_{RES} para NNE es igual al volumen útil VUE, en tanto que para NMOE el volumen de operación del embalse es cero” (Calero, 2021, p. 8).

Figura 17

Características de un embalse



Nota. a- niveles y volúmenes; b- curvas de áreas y volúmenes; c- características energéticas. Fuente: Calero (2021). NNE. -Nivel normal de embalse; NFE. -Nivel Forzado de embalse; V_{RES} .-Volumen residual; V_M .-Volumen muerto; V_{DIN} .-Volumen dinámico,

originado como consecuencia de la cobertura en la superficie del agua; V.- Volumen útil; Δh .-espesor de agua ; H.- carga ; A'B': -Puntos que conforman la curva residual de volumen útil ; F- área del espejo de agua en el embalse; E_A .-Energía acumulada; E_T .-energía de tránsito; E_{CH} .-Energía de la central hidroeléctrica. Fuente: Calero (2021).

Entonces, para el cálculo del nivel agua arriba en el embalse, si se toma en cuenta lo antes mencionado con respecto a la cota del NNE, el volumen residual será igual a el volumen útil y la carga inicial que se tendrá será igual a lo siguiente:

$$H_o = \nabla NAAR - \nabla NAAB \quad (e 22)$$

Donde:

H_o .- carga inicial

Para el cálculo del volumen generado debido a la energía secundaria máxima en la central, se tiene la siguiente ecuación:

$$P_S(kW) = 9,81 \eta QH$$

$$P_S = 9,81 * \eta * V/T * H_o$$

$$V_{ESmax} = (P_S / 9,81 * \eta * H_o) * T \quad (e 23)$$

De donde:

V_{ESmax} .- volumen máximo secundario

T .- tiempo (segundos en un día)

Para la obtención del volumen firme, se despeja de la potencia firme en la central. Teniendo la siguiente ecuación.

$$P_F(kW) = 9,81 \eta QH$$

$$P_F = 9,81 * \eta * V/T * H_o$$

$$V_F = (P_F / 9,81 * \eta * H_o) * T \quad (e 24)$$

De donde:

V_F .- volumen firme

Para saber cuál es el volumen disponible en el embalse es necesaria la suma del volumen residual en el embalse más el volumen del caudal de ingreso.

$$V_{DIS} = V_i + V_{RES} \quad (e 25)$$

De dónde:

V_i .- volumen de entrada (Hm^3)

V_{DIS} .- volumen disponible (Hm^3)

V_{RES} .- volumen residual en el embalse (Hm^3)

El valor del volumen total es igual a la suma del volumen disponible más el volumen muerto de embalse, con esto se pudo saber la cota del nivel de agua, y se obtiene un nuevo nivel aguas arriba. A partir de las curvas de embalse se puede estimar la capacidad en el nuevo nivel.

$$VTE = V_{DIS} + VME \quad (e 26)$$

De donde:

VTE .- volumen total en el embalse (Hm^3)

$VM E$.- volumen muerto en el embalse (Hm^3)

Con el nuevo nivel aguas arriba se obtiene la nueva carga y se saca un promedio entre la carga inicial y la obtenida.

$$\bar{H}_i = \frac{H_o + H_i}{2} \quad (e 27)$$

De donde:

\bar{H}_i .- carga media (m)

H_o .- carga inicial (m)

H_i .- nueva carga

Todos estos parámetros con sus respectivos resultados son de gran importancia en primera instancia, para entrar a las condiciones en el algoritmo, el cual se lo explica en el siguiente capítulo.

3.2.3 *Proceso técnico para determinación de energías en tránsito y acumulada*

3.2.3.1 **Energía de tránsito**

Es la energía producida por el flujo en tránsito, E_T , que depende del nivel de agua en el embalse o de su carga y disminuye a medida que éste se vacía. Esta energía está expresada por la curva E_T (figura 17, c), que se construye con la ecuación:

$$E_T = E * \frac{\Delta V_i}{\Delta V} \quad (Kw - hora) \quad (e 28)$$

De donde,

E_T .- Energía de tránsito ($Kw - hora$)

E_i .-Energía total generada en el día i ($Kw - hora$)

ΔV_i – Volumen de agua que ingresa en el día i

ΔV .-Volumen de agua en tránsito, para cada carga considerada.

3.2.3.2 **Energía acumulada**

Es la energía generada por el agua acumulada en el embalse, que puede llegar a distintas alturas y que su reserva genera una energía potencial (E_A), la cual es entregada a las turbinas en el momento en que se vacía el embalse. La obtención de esta energía es la resta entre la energía total generada y la energía generada en tránsito. Con la ecuación (17.1) se construye la curva E_A (figura 17, c).

$$E_i = E_A + E_T \text{ (Kw - hora)} \quad (\text{e } 29)$$

$$E_A = E_i - E_T \text{ (Kw - hora)} \quad (\text{e } 29.1)$$

De donde:

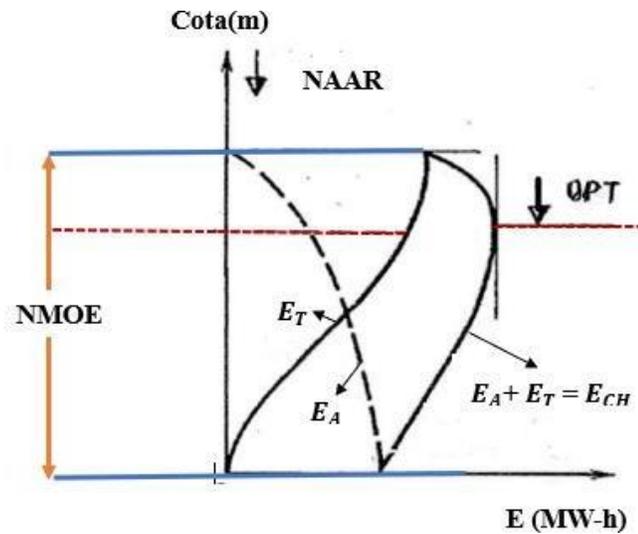
E_A .- Energía acumulada (Kw - hora)

3.2.3.3 Energía total

La sumatoria de estas dos curvas E_T y E_A la cual resulta en una nueva curva correspondiente a la energía total generada en la central hidroeléctrica $E_{CH} = E_i$.

Figura 18

Curva de energías totales



Nota. En esta curva se observa el máximo valor correspondiente al nivel de desembalse óptimo, que permite la mayor cantidad de energía generada. Fuente: Calero (2021).

El análisis se basa en tomar distintos valores para el nivel mínimo de operación en el embalse (NMOE), para cada valor de nivel le corresponde, una energía generada en tránsito y

acumulada. La cuantificación de estas energías da como resultado la energía total de producción en la central.

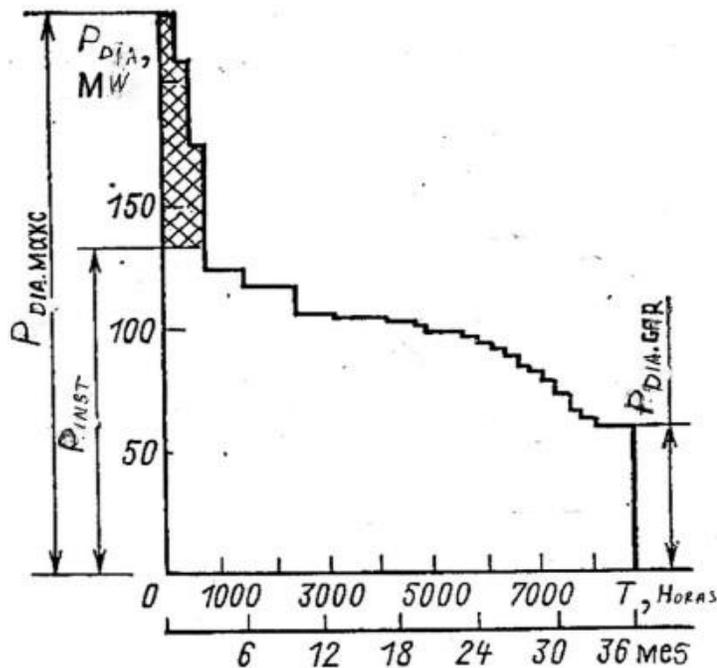
Para encontrar el nivel óptimo, se varía el NMOE hasta llegar a un valor máximo de la energía (Figura 18) , entre más valores se tomen, mayor grado de aproximación se obtendrá. La optimización en el embalse se logra a ese nivel encontrado y al cual se le acredita la máxima energía generada.

3.2.4 *Proceso técnico para la determinación de la potencia media diaria*

Como se ha mencionado, los estudios de operación de embalse se realizan a través de la simulación de operación, con la serie de caudales diarios y con el cálculo de la potencia se puede construir el gráfico de duración de las potencias medias diarias (figura 19) que permite encontrar la energía media anual producida.

Figura 19

Curva de duración de las potencias medias diarias de la Central Hidroeléctrica.



Nota. En el eje de las abscisas la escala superior el número de horas de utilización en el año referencial, la escala inferior los meses del periodo de cálculo y el eje de las ordenadas los valores de las potencias medias diarias P_{DIA} .- Potencia media diaria; $P_{D.GAR}$.- La potencia mínima en la curva de duración es la potencia media diaria garantizada; P_{INS} .- Potencia instalada; P_{DMAX} = Potencia media diaria máxima; Zona sombreada: Corresponde a la evacuación del agua sin producción de energía; Zona sin sombrear: Producción media anual real de energía. Fuente: Calero (2021).

Los valores de la potencia media diaria P_{DIA} , son las garantizadas en un día del año por el caudal del río con la carga obtenida si cada valor de la potencia media diaria del gráfico se multiplica por el número de horas. La energía anual de la central hidroeléctrica será la suma de la energía producida durante los 365 días del año.

La suma de los valores nominales de la potencia activa de todos los generadores de la CH se denomina potencia instalada (P_{INS}). “Esta potencia determina también la máxima capacidad de flujo de las turbinas. Para producir toda la energía posible es necesaria la condición $P_{INS}=P_{DMAX}$. Esta potencia, sin embargo, se producirá únicamente durante un periodo corto del año, hecho que no es favorable económicamente; por esta razón generalmente se adopta la condición $P_{INS} < P$. Este hecho significa permitir evacuaciones de agua de corta duración, sin producción de energía y una parte de la energía no se utiliza. La superficie del gráfico ubicada en la parte inferior determina la producción media anual real de energía” (Calero, 2021, p. 13).

CAPÍTULO IV

ALGORITMO

En este capítulo se describe la operación del algoritmo diseñado para encontrar soluciones de optimización, para la maximización de energía. Se presentan los fundamentos teóricos de algoritmo, explicando su estructura, su lógica de funcionamiento y principios matemáticos.

4.1 Datos de entrada

En calidad de datos de entrada es necesario tener:

- Información detallada sobre el río en donde se implantará la central hidroeléctrica, en el periodo de cálculo necesariamente se incluyen los datos históricos de caudales diarios, también es necesario el registro de caudales máximos y mínimos.
- Información de las curvas de embalse y ubicación de los niveles característicos en el embalse como son: NFE, NNE, NME, NC.
- Información del nivel al cuál va a iniciar la operación del embalse: Nivel inicial
- Información de las variaciones de descarga en la sección del río, mediante la ecuación de la curva de descarga.
- Información sobre el sistema energético en el cual opera la central datos como: la potencia instalada P_{ins} , factor de planta a , coeficiente de eficiencia η

4.2 Procesamiento de datos iniciales

El procesamiento de los datos iniciales en el algoritmo, entrega como resultados: la potencia secundaria (P_s) y garantizada (P_G); producción máxima de energía firme (E_f) y secundaria (E_s); volumen de producción energética máxima (V_{ESmax} , V_F); volumen útil en el

embalse (VUE), volumen muerto en el embalse (VME), nivel aguas abajo (∇ NAAAB) de la presa; nuevo nivel (N_i) y volumen V_{DIS} en el embalse. Estos cálculos se realizan para cada día

A modo de ejemplo se explica de manera más detallada el cálculo de cada uno de estos parámetros en el algoritmo. Con la información recabada en el capítulo de metodología, correspondientes a los datos de la central hidroeléctrica Santiago.

4.2.1 *Determinación de las potencias*

Cálculos

- *Potencia garantizada (e 14.1)*

$$\alpha = \frac{P}{P_{nom}}$$

$$0,5 = \frac{P_G}{3600 MW}$$

$$P_G = 1800MW$$

De donde:

P_S .- Potencia garantizada

- *Potencia Secundaria (e 20.1)*

$$P_S = 3600MW - 1800MW$$

$$P_S = 1800MW$$

De donde:

P_S .- Potencia secundaria

4.2.2 *Determinación de energías máximas*

Cálculos

- *Energía firme (e 19)*

$$E(kWh) = \sum_{i=1}^{24} P_{G(i)}$$

$$E_f = 1800MW * 24h * \frac{1000kW}{1MW}$$

$$E_f = 43200000kWh$$

De donde:

E_f .- Energía firme

- *Energía secundaria (e 19)*

$$E(kWh) = \sum_{i=1}^{24} P_{S(i)}$$

$$E_s = 1800MW * 24h * \frac{1000kW}{1MW}$$

$$E_s = 43200000kWh$$

De donde:

E_s .- Energía secundaria

4.2.3 *Determinación de nivel aguas abajo y carga*

Cálculos

- *Tirante h (e 18.1)*

Determinación del calado h aguas abajo. El caudal regulado $Q = 1385 \text{ m}^3/\text{s}$

$$Q = 0,68037454h^{3,235278}$$

$$1385 \text{ m}^3/\text{s} = 0,68037454h^{3,235278}$$

$$h = 10,537 \text{ m}$$

- *Nivel aguas abajo (e 21)*

El nivel aguas abajo será igual a la suma de la cota de cimentación más el calado h

$$\nabla\text{NAAB} = \text{N. C} + h$$

$$\nabla\text{NAAB} = 296\text{msnm} + 10,537$$

$$\nabla\text{NAAB} = 306,53699$$

- *Carga neta (e 22)*

Nivel inicial = $\nabla\text{NAAR} = 448 \text{ msnm}$

$$H_o = \nabla\text{NAAR} - \nabla\text{NAAB}$$

$$H_o = 448\text{msnm} - 306,54\text{msnm} = 141,46 \text{ m}$$

De donde:

H_o .- carga inicial

4.2.4 *Determinación de volúmenes máximos energéticos*

Cálculos

- *Volumen necesario para generar la energía secundaria máxima en la central (e 23).*

$$P_s(\text{kW}) = 8,5 QH$$

$$1800000\text{kW} = 8,5 Q * (141,46 \text{ msnm})$$

$$1800000\text{kW} = 8,5 * \frac{V}{T} * (141,46 \text{ msnm})$$

$$V_{\text{ESmax}} = 128,81 \text{ Hm}^3$$

- *volumen necesario para generar la energía firme máxima en la central (e 24)*

$$P_F(kW) = 8,5 QH$$

$$1800000kW = 8,5 Q * (141,46 \text{ msnm})$$

$$1800000kW = 8,5 * \frac{V}{T} * (141,46 \text{ msnm})$$

$$V_F = 128,81 \text{ Hm}^3$$

4.2.5 *Determinación de niveles y volúmenes en el embalse*

- *Volumen de entrada*

$$Q_{ent} = 1125, m^3/s$$

$$\frac{V_i}{T} = 1125,8 m^3/s$$

$$V_i = 1125,8 \frac{m^3}{s} * 86400s$$

$$V_i = 97,266 \text{ Hm}^3$$

De donde:

Q_{ent} .- caudal de entrada (m^3/s)

V_i .- volumen de entrada (Hm^3)

- *Volumen disponible (e 25)*

$$V_{DIS} = V_i + V_{RES}$$

$$V_{DIS} = 97,266 \text{ Hm}^3 + 344, 57 \text{ Hm}^3$$

$$V_{DIS} = 441,836 \text{ Hm}^3$$

De donde:

V_{DIS} .- volumen disponible (Hm^3)

V_{RES} .- volumen residual en el embalse (Hm^3)

- *Volumen total (e 26)*

$$V_{TEi} = V_{DIS} + V_{ME}$$

$$V_{TEi} = 441,836 \text{ Hm}^3 + 1162,57\text{Hm}^3$$

$$V_{TEi} = 1604,416 \text{ Hm}^3$$

De donde:

V_{TEi} .- volumen total en el embalse (Hm^3)

V_{ME} .- volumen muerto en el embalse (Hm^3)

- *Nuevo nivel*

$$N_i = 451,436 \text{ m}$$

- *Nueva carga*

$$N_i = \nabla_{NAAR}$$

$$H_i = \nabla_{NAAR} - \nabla_{NAAB}$$

$$H_i = 144,899 \text{ m}$$

- *Carga media (e 27)*

$$\bar{H} = \frac{H_o + H_i}{2}$$

$$\bar{H} = \frac{141,463\text{m} + 144,899\text{m}}{2}$$

$$\bar{H} = 143,181 \text{ m}$$

4.3 Casos en función del volumen disponible

En este apartado se explica el procedimiento teórico a seguir para la operación en el embalse. Se expone cinco casos distribuidos de manera descendente debido al comportamiento del embalse. A cada caso le corresponde una distinta ubicación del nivel de agua, siendo A el nivel más bajo pertinente a condiciones hidrológicas secas y E el nivel más alto pertinente a condiciones

----- Posible nivel al que llega el agua, debido al V_i

En el caso de que está relación $(V_i/V_{Fi} + V_{ESmax})$ sea menor a 1, la energía en tránsito se calcula multiplicando la energía total E_i por la relación y en el caso de que la relación sea igual a 1 la energía total E_i es igual a la energía en tránsito E_{TRI} .

Descripción del caso

P_i = Es la máxima

N_i = NFE

E_F = Es la máxima

V_S = máximo

E_S = Es la máxima

V_F = máximo

$$E_{TRI} = E_i * (V_i/V_{Fi} + V_{ESmax})$$

$$E_A = E_{Ai} = E_i - E_{TRI}$$

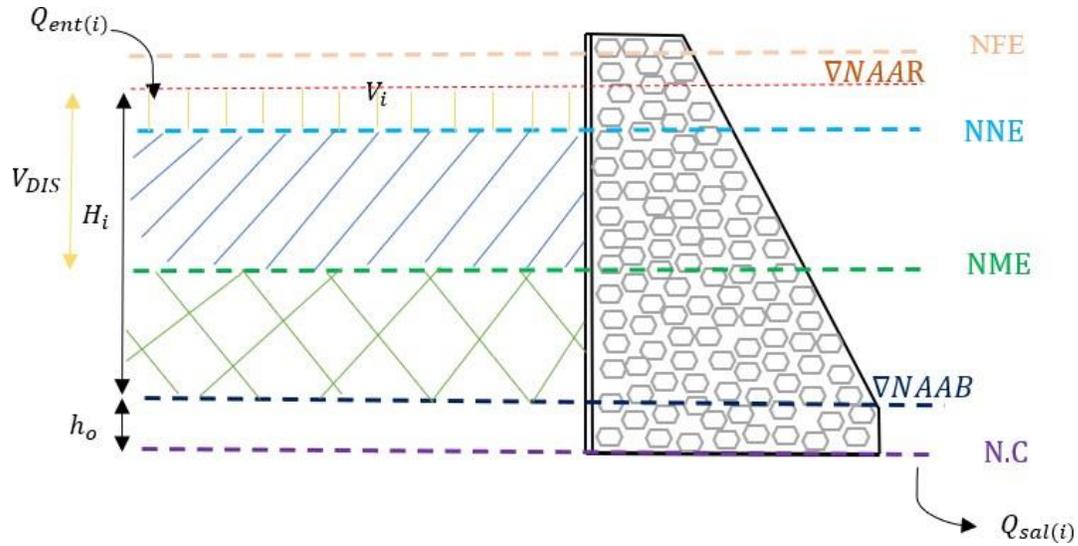
4.3.2 Caso D

En este caso el volumen al que llega el agua en el embalse está sobre el NNE pero por debajo del NFE. Se debe calcular como parámetro inicial el volumen secundario que se usa para la generación de energía secundaria. El volumen disponible es menor al VUE más los volúmenes utilizados por la energía firme y secundaria, por lo tanto, la energía total es menor a la máxima. El nivel final en el embalse para el siguiente día es el NNE.

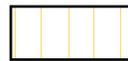
En el caso de que está relación $(V_i/V_{Fi} + V_{Si})$ sea menor a 1, la energía en tránsito se calcula multiplicando la energía total E_i por la relación y en el caso de que la relación sea igual a 1 la energía total E_i es igual a la energía en tránsito E_{TRI} .

Figura 21

Caso D -Niveles en el embalse



Nota. $V_{DISi} \leq VUE + V_{Fi} + V_{ESmax}$ (Sobre NNE). Elaborado por: La autora



= Volumen generado por energía secundaria



= Volumen útil de embalse



= Volumen muerto de embalse



Nivel al que llega el agua, debido al V_i

Descripción del caso

P_i = Es menor a la máxima

$N_{i=}$ NNE

E_F = Es la máxima

E_S = Es menor a la máxima

$$E_{TRI} = E_i * (V_i / (V_{Fi} + V_{Si}))$$

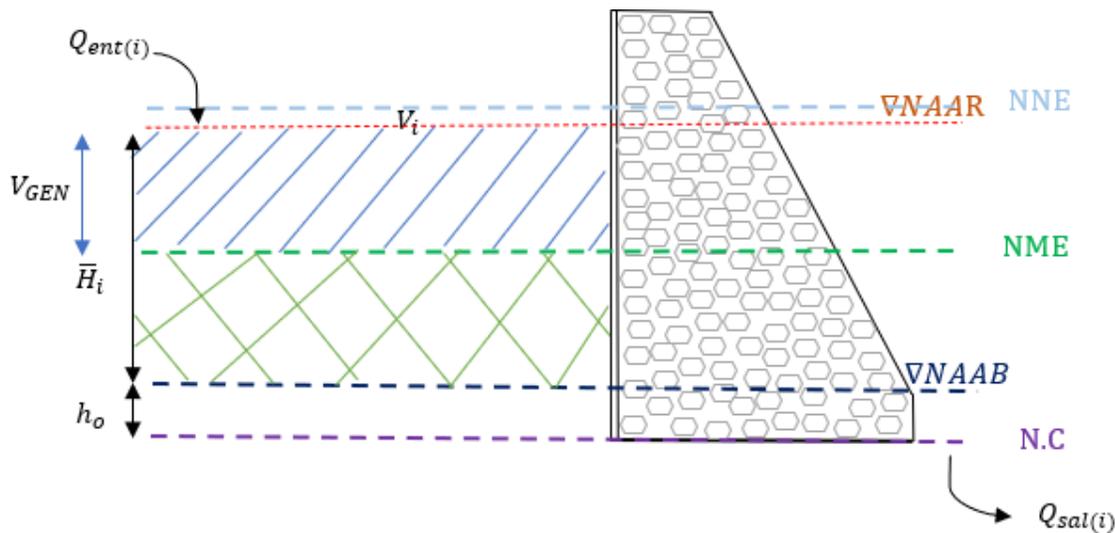
$$E_A = E_{Ai} = E_i - E_{TRI}$$

4.3.3 Caso C

En este caso, el nivel al que llega el agua está por debajo del NNE, la capacidad hasta este nivel llega a ser parte del VUE, que es utilizado para la generación de energía firme ($V_{GEN} = V_{DIS}$) dando como resultado la generación de energía secundaria nula. La potencia total que se produce en la central será igual a la garantizada. El nivel final en el embalse para el siguiente día es mayor al día anterior.

Figura 22

Caso C -Niveles en el embalse



Nota. $V_{GENi} \leq V_{Fi}$ (nivel dentro del VUE). Elaborado por: La autora



= Volumen generado, capaz de producir E_F



= Volumen muerto de embalse



Nivel al que llega el agua, debido a V_i

Descripción del caso

P_i = Potencia garantizada

$NME \geq N_i < NNE$

E_F = Es la energía total

$V_S = 0$

$E_S =$ no existe

$$V_F \leq V_i$$

$E_A =$ No se genera energía acumulada, es igual a cero

$E_{TRI} =$ Es toda la energía generada, es la total (E_i)

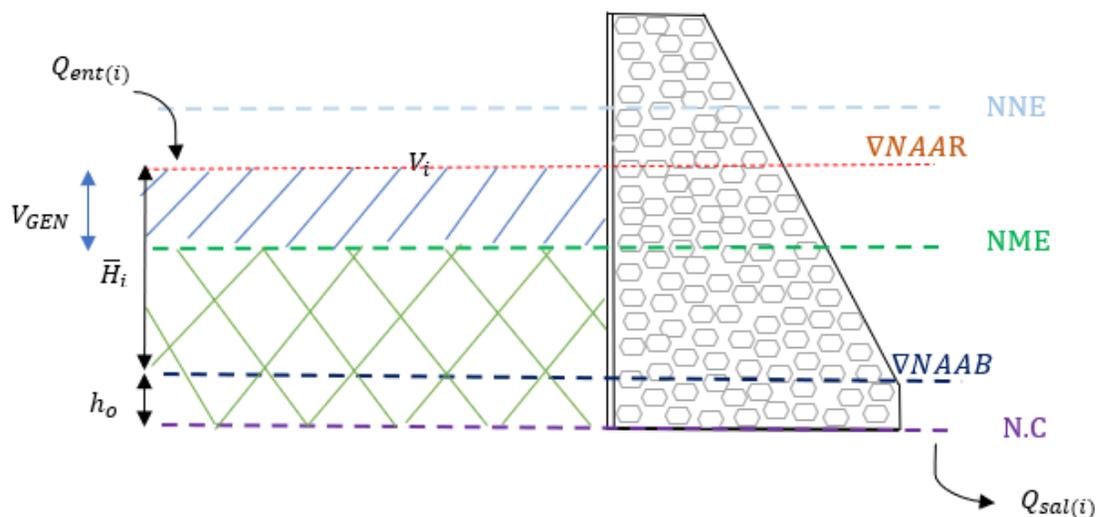
4.3.4 Caso B

En este caso la reserva en el embalse es mínima, sin embargo, aún se puede satisfacer la demanda de energía, al producir volumen firme (V_F), pero este volumen es mayor al volumen de entrada (V_i) y la potencia total llega a ser la potencia garantizada en el embalse. El nivel final en el embalse para el siguiente día se encuentra dentro del VUE y es menor al nivel del día anterior.

En el caso de que está relación ($V_i/V_{Fi} + V_{Si}$) sea menor a 1, la energía en tránsito se calcula multiplicando la energía total E_i por la relación y en el caso de que la relación sea igual a 1 la energía total E_i es igual a la energía en tránsito E_{TRI} .

Figura 23

Caso B -Niveles en el embalse



Nota. $V_i \leq V_{Fi}$ (Bajo NNE). Elaborado por: La autora

 = Volumen generado, capaz de producir E_F



= Volumen muerto de embalse



Nivel al que llega el agua, debido al V_i

Descripción del caso

P_i = Potencia garantizada

$$NME > N_i \leq NNE$$

E_F = Es la energía total

$$V_S = 0$$

E_S = no existe

$$V_F \geq V_i$$

$$E_{TRI} = E_i * (V_i/V_{Fi} + V_{ESmax})$$

$$E_A = E_{Ai} = E_i - E_{TRI}$$

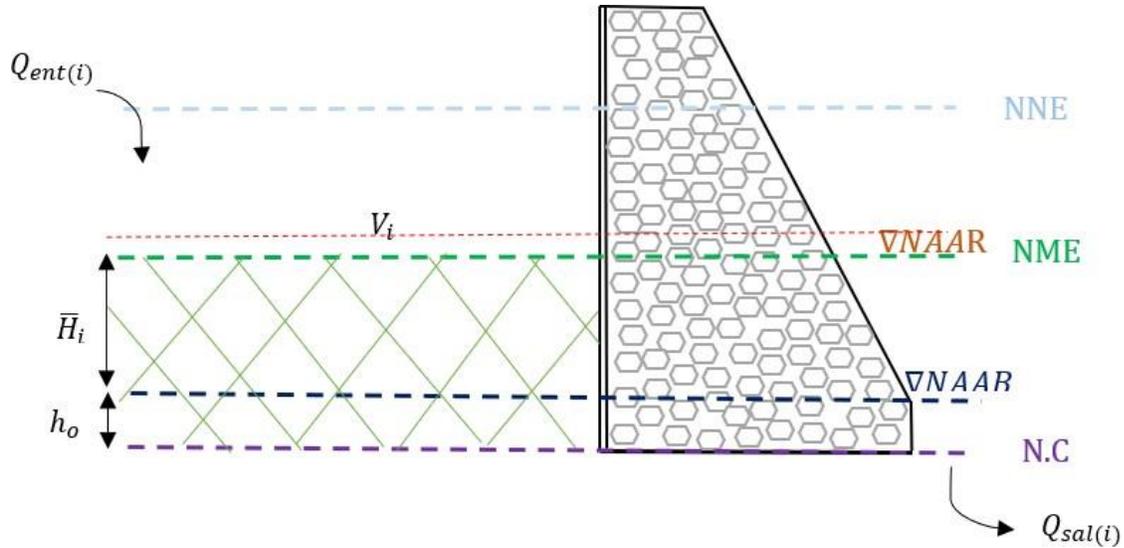
igual a la energía total

4.3.5 Caso A

Este caso es el más desfavorable, es el periodo en el que la central prácticamente no presenta almacenamiento de agua, no se llega a satisfacer la demanda de energía firme necesaria en el día, y se usa la totalidad de agua que ingresa al embalse, la cota a la que el agua llega roza el NME, por tanto, el volumen residual para operación del embalse es cero y su potencia total es menor a la potencia garantizada. El nivel final en el embalse para el siguiente mes es el NME.

Figura 24

Caso A -Niveles en el embalse



Nota. $V_{GEN} \leq V_{Fi}$ (Oscila NME; $\Delta V_i = 0$). Elaborado por: La autora



= Volumen muerto de embalse



Nivel al que llega el agua, debido al V_i

Descripción del caso

P_i = menor a la potencia garantizada

$N_i =$ NME

E_F = No se genera la suficiente

$V_S = 0$

E_S = no existe

$V_{Fi} \geq V_{GEN}$

E_A = No se genera energía acumulada, es igual a cero

E_{TRI} = Toda la energía que puede generar el volumen de entrada V_i

4.3.6 *Maximización de la energía*

En el procedimiento de la optimización del NMOE, para el objetivo de maximizar la producción de energía se utilizó el complemento Solver de la aplicación Excel.

“Solver es una herramienta de análisis que permite resolver problemas de optimización mediante la modificación de un conjunto de celdas variables para maximizar o minimizar una celda objetivo, cumpliendo con ciertas restricciones” (Microsoft Corporation©, 2017).

Con ello se define lo siguiente:

- **Celda variable** : Se selecciono la celda que representa el nivel mínimo de operación en el embalse (NMOE) y se definen rangos de valores permitidos, ya que los niveles de agua no pueden superar ciertos límites, estos están establecidos dentro del NNE y el nivel aguas abajo de la presa.
- **Celda Objetiva**: Se selecciono la celda que representa la producción de energía de la central hidroeléctrica. Está celda representa la sumatoria de las energías en tránsito y acumulada, que dan el valor de la función objetiva que se desea maximizar.

La herramienta ajustará iterativamente las variables que toma del nivel mínimo de operación (NMOE) y como resultado se mostrará el valor máximo de energía que se puede generar bajo las condiciones establecidas a un NMOE óptimo encontrado.

4.3.7 *Aplicación del Algoritmo*

El objetivo principal del algoritmo es la maximización de producción de la energía, que se logra con la optimización del nivel mínimo de operación en el embalse. Para ello se ha implementado una serie de pasos para el ingreso y procesamiento de datos, que van a arrojar resultados consecuentes con el objetivo planteado.

Para la elaboración del algoritmo se ha hecho una aplicación en Excel con macros, que cuenta con 5 módulos:

- Curvas de embalse
- Caudal
- Información general
- Cálculos
- Resultados

4.3.7.1 Curvas de embalse

En el primer módulo se debe ingresar información referente a los niveles en el embalse, ubicando la cota más baja hasta la más alta (descendente), correspondiéndole a cada una el respectivo volumen de almacenamiento en Hm^3 , con estos datos de manera dinámica se gráfica la curva cota- volumen.

4.3.7.2 Caudal

El segundo módulo se basa en los datos genéricos del caudal de carácter mensual y diario a lo largo de un año hidrológico, los meses de enero a diciembre. A este se le pueden adicionar datos de más años, solo se debe agregar a la hoja de cálculo los datos necesarios a usarse y arrastrar las celdas correspondientes a estas.

Se debe ingresar las fechas correspondientes al periodo de estudio en análisis, en la siguiente columna se debe ingresar los datos correspondientes a los caudales medios mensuales, esta información es transformada a nivel diario, por ejemplo, si el periodo es de un año, se colocan datos correspondientes a los doce meses y el cálculo que realiza se lo hará para los 365 días del año.

4.3.7.3 Información general

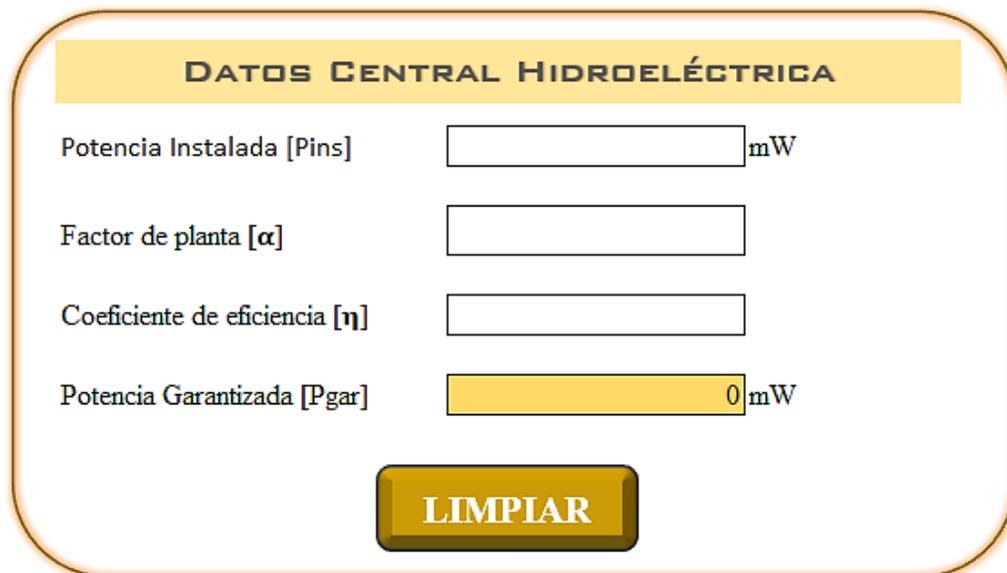
En el tercer módulo se utiliza una hoja de cálculo denominada “Información general”, donde se ingresan una serie de variables y datos iniciales del programa. Aquí se solicita al usuario el ingreso de información elemental en el proyecto, tales como:

Central hidroeléctrica

Aquí se requiere información referente a las características y potenciales de la central. El ingreso de esta información es necesario para el cálculo de la potencia garantizada, energías firme y secundaria que se presenta en la hidroeléctrica.

Figura 25

Datos de la central hidroeléctrica que ingresar al algoritmo



El formulario, titulado "DATOS CENTRAL HIDROELÉCTRICA", contiene los siguientes campos de entrada:

Potencia Instalada [Pins]	<input type="text"/>	mW
Factor de planta [α]	<input type="text"/>	
Coefficiente de eficiencia [η]	<input type="text"/>	
Potencia Garantizada [Pgar]	<input type="text" value="0"/>	mW

Debajo de los campos se encuentra un botón amarillo con el texto "LIMPIAR".

Nota. La potencia garantizada se calcula automáticamente, al ingresar los datos de la potencia instalada y factor de planta. Elaborado por: La autora.

Hidrología

Se recaba información del caudal medio anual, y de los parámetros de la curva de descarga. Para correr el algoritmo, se toma como punto de partida para el primer día, el dato del caudal medio anual y se calcula el tirante h en la curva de descarga, los parámetros en esta curva están designados acorde a la ecuación, siendo **a** una constante de multiplicación y **b** una constante exponencial. (e 17).

Figura 26

Datos hidrológicos que ingresar al algoritmo

El formulario, titulado "DATOS HIDROLÓGICOS- CURVA DE DESCARGA", contiene los siguientes campos de entrada:

- Caudal Medio Anual: m³/s
- Curva de descarga [a]:
- Curva de descarga [b]:
- Calado [h₀]: m

Debajo de los campos se encuentra un botón verde con el texto "LIMPIAR".

Nota. El calado se obtiene a partir de la fórmula de la curva de descarga, se calcula de manera automática. Elaborado por: La autora.

Embalse

La información correspondiente a los niveles y volúmenes característicos del embalse y el ingreso de un nivel inicial que servirá como punto de partida para la simulación de la operación en el embalse. Los datos de entrada que se calculan son el VME y VUE

Figura 27

Datos del embalse que ingresar al algoritmo

El formulario, titulado "DATOS EMBALSE", contiene cinco campos de entrada de texto con el sufijo "msnm" a la derecha de cada uno:

- Cota Cimentación
- Nivel Normal- NNE
- Nivel Forzado- NFE
- Nivel Inicial
- Nivel Muerto- NME

Debajo de los campos se encuentra un botón rectangular con el texto "LIMPIAR".

Nota. Aquí existen restricciones en cuanto a los valores del NNE que debe ser menor al NFE y que el NME debe ser mayor a la cota de cimentación. Elaborado por: La autora.

Hidro energética

Como último se calcula los datos de entrada correspondientes a la energía firme, energía secundaria y el volumen máximo secundario generado.

Tabla 6

Datos hidroenergéticos calculados

Información Hidroenergética
Energía firme [EF]
Energía secundaria [Es]
Volumen secundario máximo[VSE_max]

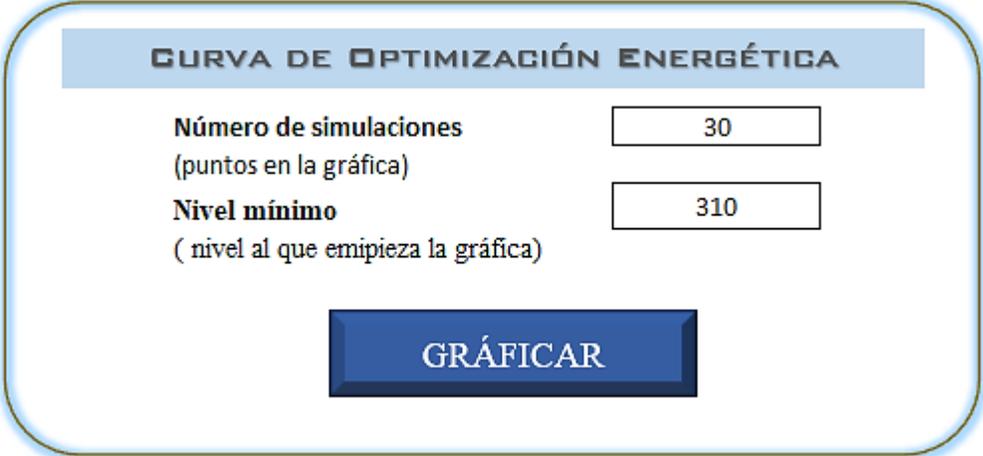
Nota. Estos datos se calculan a partir del ingreso de información de entrada al algoritmo. Elaborado por: La autora.

Curva de optimización energética

Este módulo también cuenta con un apartado en dónde se ingresa los datos para graficar la curva de energías y observar en dónde se da su maximización. Esta cuenta con dos datos de ingreso como son el número de simulaciones que debe realizar el programa (corresponde al número de puntos en la gráfica) y al nivel al cual se querrá que empiece la simulación (corresponde al punto mínimo en la gráfica).

Figura 28

Datos de ingreso al algoritmo para graficar la curva de energías



El formulario tiene un título "CURVA DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA" en un encabezado azul. Debajo, hay dos campos de entrada de texto con sus respectivos labels y descripciones:

Número de simulaciones (puntos en la gráfica)	30
Nivel mínimo (nivel al que emipieza la gráfica)	310

En la parte inferior del formulario hay un botón azul con el texto "GRÁFICAR".

Nota. La gráfica se la podrá observar en el módulo de resultados. Elaborado por: La autora.

4.3.7.4 Cálculos

El cuarto módulo corresponde a los cálculos del algoritmo, en dónde corre el programa usando la información de los módulos anteriores con datos de entrada ya ingresados. En este módulo ocurre la simulación en el embalse, calculando todos los casos simultáneamente desde E hasta A y en función de las condiciones que se tiene en el embalse, la aplicación selecciona el caso adecuado y realiza la cuantificación de las energías que se generan en tránsito y acumulada,

también arroja datos finales del nivel aguas arriba y la carga para el siguiente día. Esta hoja no está disponible para el usuario.

4.3.7.5 Resultados

El último módulo contiene datos de salida del programa en forma diaria, es decir se muestran los resultados producto de la simulación, los cuales se pueden visualizar de manera gráfica, estas representaciones son: hidrograma de caudales medios diarios, curva de duración de las potencias medias diarias, gráfica de la energía firme y máxima, gráfica de comportamiento de los niveles en el embalse, la curva de optimización energética.

En este módulo se presentan resultados de manera diaria por fecha, los caudales de ingreso diario; el nivel de embalse al que llego al final del día; la energía en tránsito, acumulada y total diaria; la selección del caso; la potencia diaria.

También es proporcionada una tabla resumen que contiene la siguiente información:

Tabla 7

Tabla resumen proporcionada en el módulo de resultados

Resultados
Energía Total Generada (KW - hora)
Energía Tránsito Generada (KW - hora)
Energía Acumulada Generada (KW - hora)
Días con Energía Máxima Generada
Días con Energía Firme Generada
Días con Déficit de Energía

Nota. En esta tabla se puede observar los resultados de manera numérica y porcentual.

Elaborado por: La autora.

CAPÍTULO V

APLICACIÓN DEL ALGORITMO AL CASO DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO SANTIAGO.

En este capítulo se muestran los resultados de la aplicación del algoritmo para 3 distintos escenarios. Tomando como ejemplo a la hidroeléctrica Zamora Santiago que posee un embalse de regulación y que consta de dos etapas, divididas en: escenario 1 y escenario 2. De igual manera se ha probado el algoritmo para un escenario hipotético, cambiando las condiciones en el embalse, teniendo así un panorama más amplio de los posibles resultados que se pueden presentar.

5.1 Caso a nivel de factibilidad y diseños definitivos del Proyecto hidroeléctrico Santiago.

Durante un estudio realizado de parte del personal CELEC Y CFE con visitas a la zona y un extenso análisis de la información recopilada en campo, se identifica un sitio que cuenta con un excelente aprovechamiento hídrico, ubicado aguas debajo de los ríos Zamora y Namangoza (río Santiago). Este sitio denominado G8 cuenta con un gran potencial viable hidro energético que sobrepasa a sitios reconocidos con anterioridad en el río Zamora (sitios G9, G10) y por ello CELEC-EP le dio prioridad a los estudios del mismo.

La siguiente información es usada para el escenario 1 y escenario 2 del Proyecto hidroeléctrico Santiago, como son:

- Curvas de embalse (tabla 8)
- Caudales históricos de los años que datan de 1984 hasta el 2010 (tabla 9)

Además, es necesaria la información de caudales mínimos y máximos que fluyen en el río Santiago en el período de estudio. Cuanto mayor sea el caudal, más agua podrá pasar por la central y, por lo tanto, mayor será la producción de energía. Por otro lado, en períodos de caudales bajos, la producción de energía puede disminuir considerablemente, ya que la cantidad de agua disponible

para mover las turbinas será menor. Debido a esto se hará la simulación para el primer decil y noveno decil del caudal medio, respectivamente:

- Caudales mínimos Q90 y máximos Q10 (tabla 10)

Tabla 8

Curvas Elevaciones-Áreas- Capacidades (Curvas de Embalse)

Cota(msnm)	Área(km ²)	Capacidad(Hm ³)		Cota(msnm)	Área(km ²)	Capacidad(Hm ³)
295	0,00	0,00		390	11,36	435,81
297	0,07	0,11		395	12,41	495,50
300	0,11	0,37		400	13,54	560,62
305	0,31	1,65		405	14,74	631,57
310	0,51	3,88		410	15,88	708,27
315	0,96	8,18		415	17,12	790,99
320	1,53	15,03		420	18,32	879,86
325	2,07	24,27		425	19,56	974,87
330	2,67	36,37		430	20,84	1076,23
335	3,32	51,55	NMOE	434	22,08	1162,57
340	3,96	69,97		435	22,23	1184,77
345	4,56	91,39		440	23,98	1301,18
350	5,15	115,77		445	25,89	1426,62
355	5,77	143,20		447	27,02	1479,94
360	6,44	173,86	NNE	448	27,37	1507,14
365	7,13	207,91		450	28,08	1562,60
370	7,80	245,33	NFE	453	29,65	1649,90
375	8,57	286,38		455	30,37	1709,90
380	9,46	331,52		460	32,70	1868,56
385	10,38	381,28		465	35,47	2039,84
				470	38,64	2225,74

Nota. NMOE.- en la cota 434; NNE en la cota 448; NFE en la cota 453. Fuente: CELEC-EP (2016).

Tabla 9*Datos históricos de caudales medios mensuales (m³/s) en sitio del Proyecto G8*

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1984	911	1562	1520	1815	1516	1890	1706	1431	1354	1416	1159	1285
1985	1105	849	983	1165	1323	1992	1666	1665	1210	1391	1002	982
1986	1034	1110	1156	1771	1717	1541	1795	1061	1640	1377	1461	1374
1987	1425	1994	1387	1782	1684	1732	1751	1436	1454	1278	1112	1037
1988	1046	1719	1040	1872	1743	1327	1492	1351	1002	1508	1498	1141
1989	1334	1450	1413	1308	1825	2183	1818	1261	1069	1466	1117	599
1990	1340	1305	1607	1438	1337	2297	1683	1252	1102	1105	1295	1223
1991	961	1250	1242	1369	1530	1686	1735	1218	1113	1069	1161	888
1992	851	952	1314	1202	1094	1691	1362	1094	1312	915	923	1347
1993	1289	1381	1637	1705	1428	2048	1643	1398	1351	1349	1284	1204
1994	1256	1270	1417	1654	1720	1983	1756	2379	1570	1519	1353	1370
1995	1140	901	1166	1249	1670	1525	1605	1115	1184	1061	1195	1078
1996	1337	1356	1346	1610	1559	1568	1695	1377	1362	1297	1160	1619
1997	972	1290	1394	1564	1952	1346	1592	1687	1133	1249	1440	1206
1998	1182	1182	1372	1687	1430	1763	1738	1224	1164	1336	1172	1371
1999	1514	1442	1434	1867	1729	1626	1597	1331	1557	1324	1300	1183
2000	1163	1269	1406	1624	1902	1862	1503	1470	1395	1219	943	1244
2001	1339	1295	1410	1743	1618	2210	1712	1346	1241	1046	938	1185
2002	909	1246	1258	1599	1906	1588	1703	1364	1117	1330	1079	1239
2003	1174	1198	1233	1726	2524	1781	1894	1317	1135	1148	962	1054
2004	783	819	1476	1350	1694	2891	1828	1339	1327	1366	1396	1268
2005	845	1448	1449	1861	1590	2075	1587	1168	1218	902	1007	939
2006	1154	1258	1244	1441	1392	1443	1570	1199	1258	1031	1194	1133
2007	1430	820	1271	1525	1661	2335	1157	1293	1087	1113	1884	1016
2008	1070	1587	1316	1477	1757	1706	1577	1122	1335	1186	1253	1064
2009	1260	1113	1177	1695	1447	1425	1676	1252	991	991	1049	972
2010	726	1207	874	1229	1765	1457	1439	979	701	1347	1205	1074
2011	780	1031	853	1754	1595	2123	3194	1103	1313	978	1105	1435
2012	1317	1546	1432	1693	1856	1756	2464	1748	1000	1076	987	976
Qm	1125,8	1270,7	1304,4	1578,4	1653,9	1822,4	1722,0	1344,1	1230,9	1220,4	1194,3	1155,4

Nota. Matriz de caudales históricos recabados desde 1984 hasta el 2012. Qm.- Caudal medio representativo a cada mes. Fuente: CELEC-EP (2016).

Tabla 10

Datos de caudales medios mínimos Q(90) y máximos Q(10)

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Q90	783	849	983	1229	1337	1425	1439	1094	1000	978	943	939
Q10	1425	1587	1520	1861	1906	2297	1894	1687	1557	1466	1461	1374

Nota. Los Q(10) representan caudales en el periodo húmedo y los Q(90) a los caudales en el periodo seco. Elaborado por: La autora.

5.2 Escenario 1

En este escenario se tomó en cuenta los estudios de factibilidad en base al informe ejecutivo de diseños del Proyecto hidroeléctrico Santiago CELEC-EP 2016. Donde se esperaba una plena explotación del recurso hidráulico mediante la instalación de una potencia de 3600 MW.

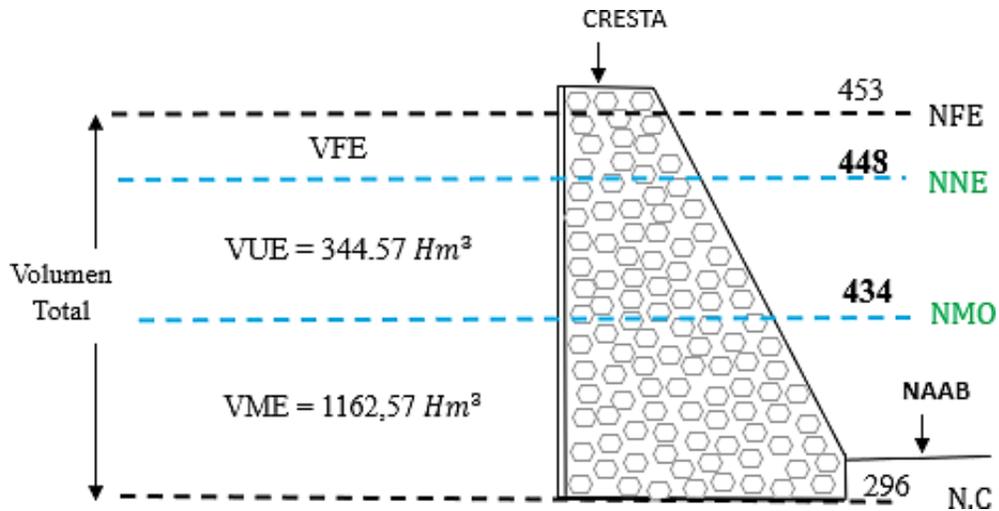
El proyecto hidroeléctrico Santiago G8 a nivel de factibilidad, corresponde a una central con embalse que se identifica con los siguientes niveles y volúmenes característicos (Figura 29).

El nivel de aguas máximo de emergencia se encuentra en la cota 453 msnm, el nivel máximo de operación normal de embalse está ubicado en la cota 448 msnm, el nivel mínimo de operación del embalse se ubica en la cota 434 msnm, con un volumen útil de 344,57 Hm³. La capacidad a la que llega el embalse correspondiente al volumen muerto es de 1162,57 Hm³, Para este represamiento de agua se tomó a la cota de implantación del proyecto o de cimentación 296 msnm.

La central hidroeléctrica Santiago para nivel de factibilidad tiene una capacidad de generación máxima de 3600 MW para un factor de planta 0,5. El proyecto no presenta peligros evidentes, aunque se realizarán estudios más profundos para garantizar que no presente riesgos relevantes a futuro en su ejecución.

Figura 29

Representación de los niveles de embalse en el sitio del proyecto G8-Escenario 1



Nota. nivel de cimentación de la presa (N.C) ; nivel de agua mínimo de operación (NME); nivel de agua máxima de operación (NNE); nivel de agua máximo de emergencia (NFE); VFE.- volumen forzado del embalse; VUE.- volumen útil del embalse; VME.- volumen muerto de embalse; NAAB.- nivel agua abajo. Elaborado por: La autora, obtenida de la información proporcionada por CELEC- EC (2016).

5.2.1 Datos de entrada

5.2.1.1 Embalse

Para la simulación del algoritmo en primera instancia se hace el ingreso de información del Proyecto G8 correspondiente a datos de las curvas de embalse (tabla 8).

5.2.1.2 Caudales

Como segundo punto es necesario el ingreso de los caudales afluentes en el río Santiago, sitio del Proyecto G8. Los cuales constan de un registro de datos históricos de un total de 29 años, que datan de 1984 hasta 2012.

De estos datos la simulación se realizó para:

- Caudales medios mensuales Q_m
- Caudales mínimos (Q_{90}) y máximos (Q_{10})
- Caudales históricos(1984-2012)

5.2.1.3 Información General

Los datos de entrada ingresados en la hoja de cálculo denominada **Información General**, para el escenario primero en estudio es el siguiente:

Tabla 11

Ingreso de datos de la central hidroeléctrica Santiago a la aplicación

Información Central Hidroeléctrica	Ingreso de Datos
Potencia Garantizada [Pgar]	1800
Factor de planta [a]	0,5
Coefficiente de eficiencia [η]	0,87
Potencia Instalada [Pins]	3600

Nota. Los datos de las potencias están en unidades de MW. Elaborado por: La autora.

Tabla 12

Ingreso de datos hidrológicos de la hidroeléctrica Santiago a la aplicación

Información Hidrológica	Ingreso de Datos
Caudal Medio Anual	1385
Curva de descarga [a]	0,68037454
Curva de descarga [b]	3,235278

Nota. Los datos del caudal están unidades de m^3/s . Elaborado por: La autora.

Tabla 13*Datos hidro energéticos calculados de la hidroeléctrica Santiago a la aplicación*

Información Hidroenergetica	
	Datos calculados
Volumen secundario máximo[VSE_max]	128,811152
Energía firme [EF]	43 200 000
Energía secundaria [Es]	43 200 000

Nota. Las energías están en unidades de kW-h y el volumen de generación máxima garantizada en unidades de Hm^3 . Elaborado por: La autora.

Tabla 14*Ingreso de datos de embalse de la hidroeléctrica Santiago a la aplicación*

Información del Embalse	Ingreso de Datos
NC	296
NNE	448
NFE	453
Nivel Inicial	448
Volúmenes	Datos calculados
NME	434
VUE	344,57
VME	1162,57

Nota. Los datos de los niveles están unidades de m y los volúmenes en Hm^3 .

Elaborado por: La autora.

5.2.2 *Resultados*

5.2.2.1 **Hidrograma**

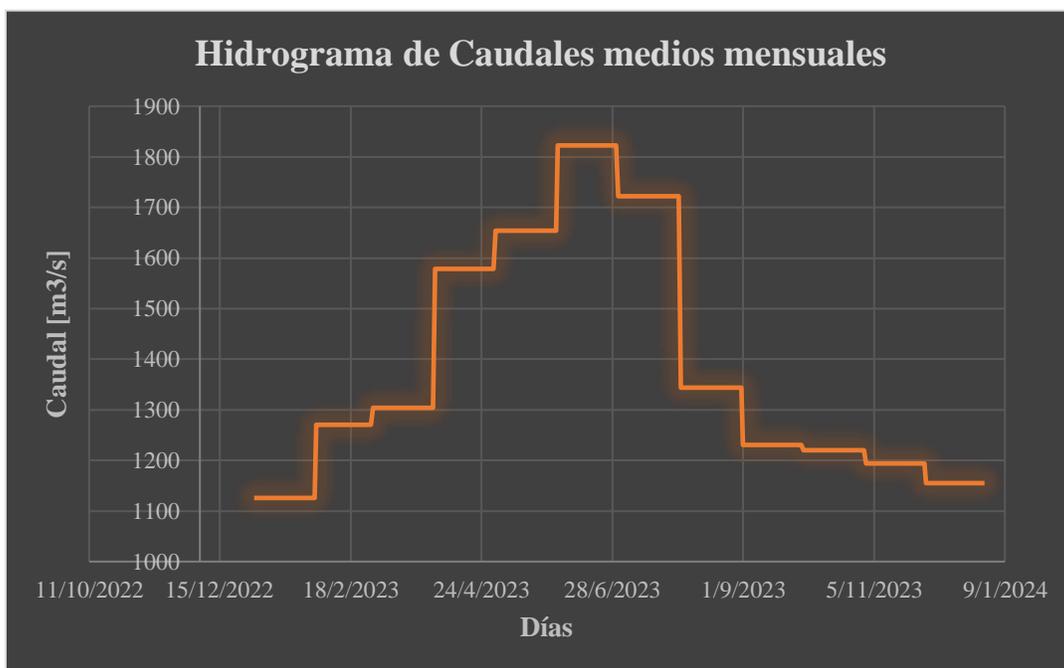
La figura 30 hace referencia a la presentación de caudales medios diarios del año hidrológico en estudio. En este hidrograma se puede observar el régimen fluvial del río Santiago.

El caudal más bajo (1125,8 m³/s) se presenta en el mes de enero y se va incrementando hasta llegar al máximo en el mes de junio (1822,4 m³/s), posteriormente desciende nuevamente.

Se evidencia que los meses con más afluencia de caudal son desde el mes de abril hasta julio, y el periodo de estiaje en la cuenca, es decir donde se registran valores más bajos de caudales se dan en los meses de agosto a marzo.

Figura 30

Hidrograma de caudales medios mensuales del Proyecto Santiago



Nota. Representación gráfica de las variaciones del caudal en el periodo de un año. En el eje de las abscisas están los días y de las ordenadas los caudales en m³/s. Curva de duración de potencias medias diarias, Q90 y Q10. Elaborado por: La autora.

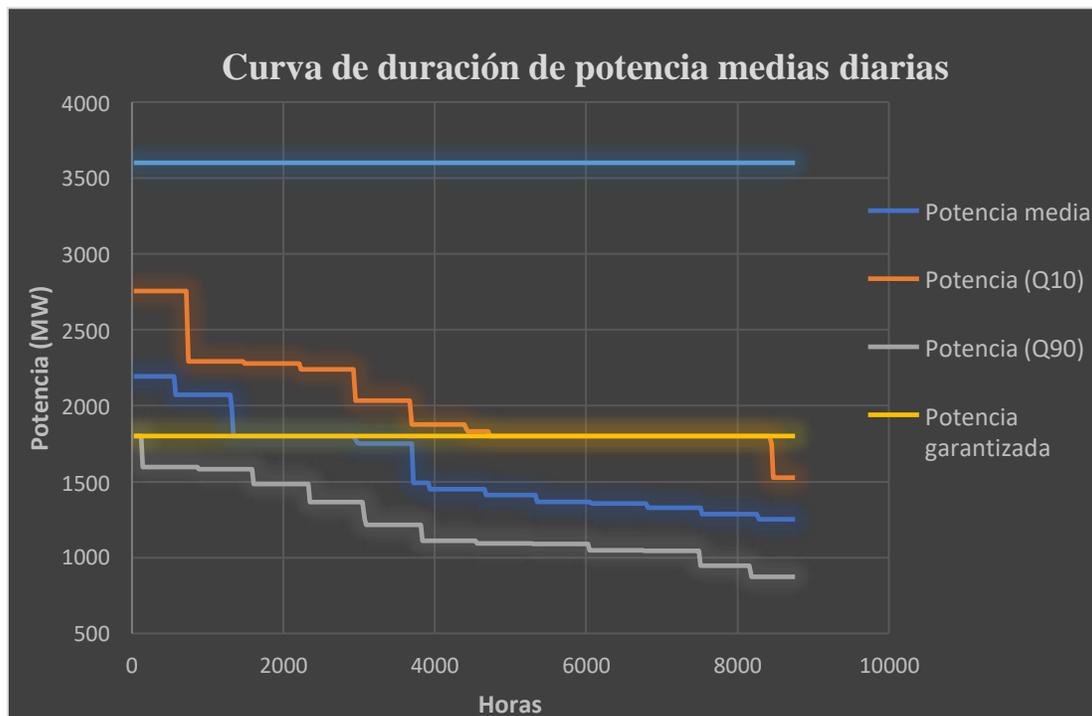
5.2.2.2 Curva de duración de potencias diaria

Con los resultados de la simulación se construye el gráfico de duración de las potencias medias diarias (figura 31). Se obtiene para la curva de la potencia promedio un valor de 2904 horas al año de potencia garantizada, correspondiente apenas al 33,1 % en horas para la garantía de la producción de energía.

Para los datos que corresponden a un periodo húmedo Q10 el valor es de 8424 horas al año de potencia garantizada, correspondiente al 96,16 %, mientras que para un periodo seco Q90 el valor disminuye a 120 horas de generación de potencia garantizada, correspondientes al 1,37%.

Figura 31

Curva de duración de potencias medias diarias-Escenario 1



Nota. Los valores de las potencias están dispuestos en orden descendente en el eje de las ordenadas y en las abscisas el número de horas en el año referencial. Elaborado por: La autora.

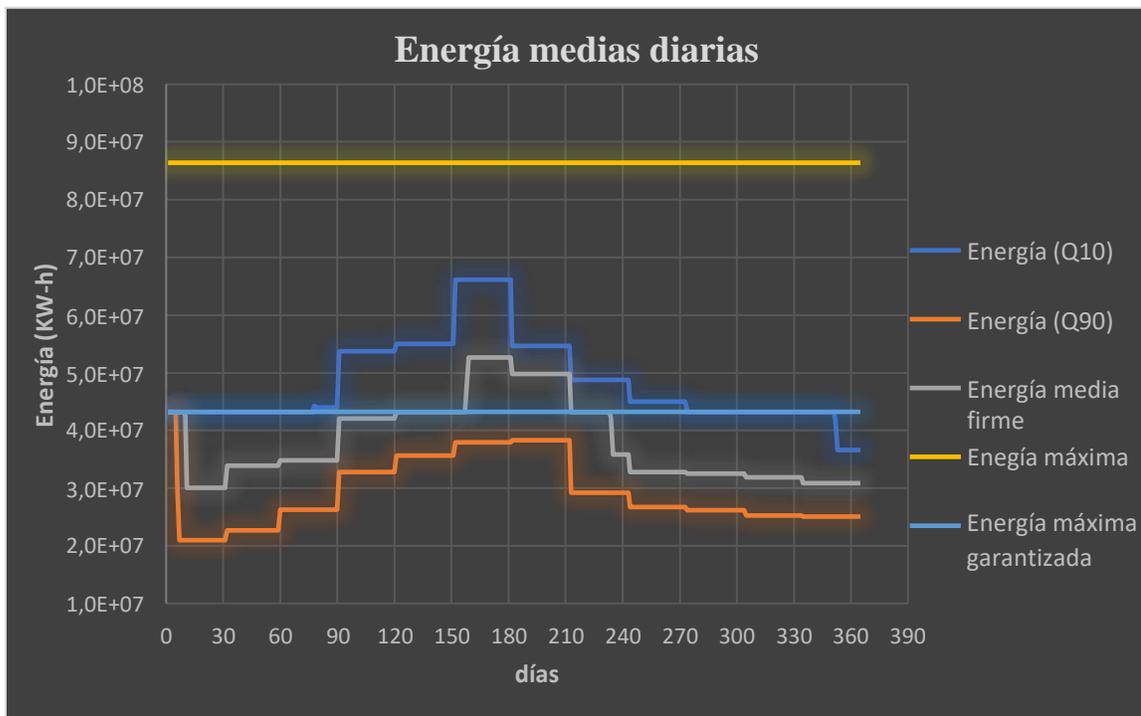
5.2.2.3 Producción de energía, Q10 y Q90

Para los datos de energía promedio, se llega a apreciar que tan solo 122 días de este periodo son dedicados a la producción de energía firme y el restante que le dobla en días es tomado como un déficit de energía que no llega a satisfacer la producción en demanda (figura 32)

Para los datos Q90, los días de producción de energía firme se reducen a 5 y para los datos Q10 los días en total son 352, representando la máxima generación de energía firme en este periodo.

Figura 32

Gráfica de producción de las energías medias diaria, Q10 y Q90 - Escenario 1



Nota. En el eje de las abscisas la escala superior el número de días de utilización en el año referencial y el eje de las ordenadas los valores de las energías. Elaborado por: La autora.

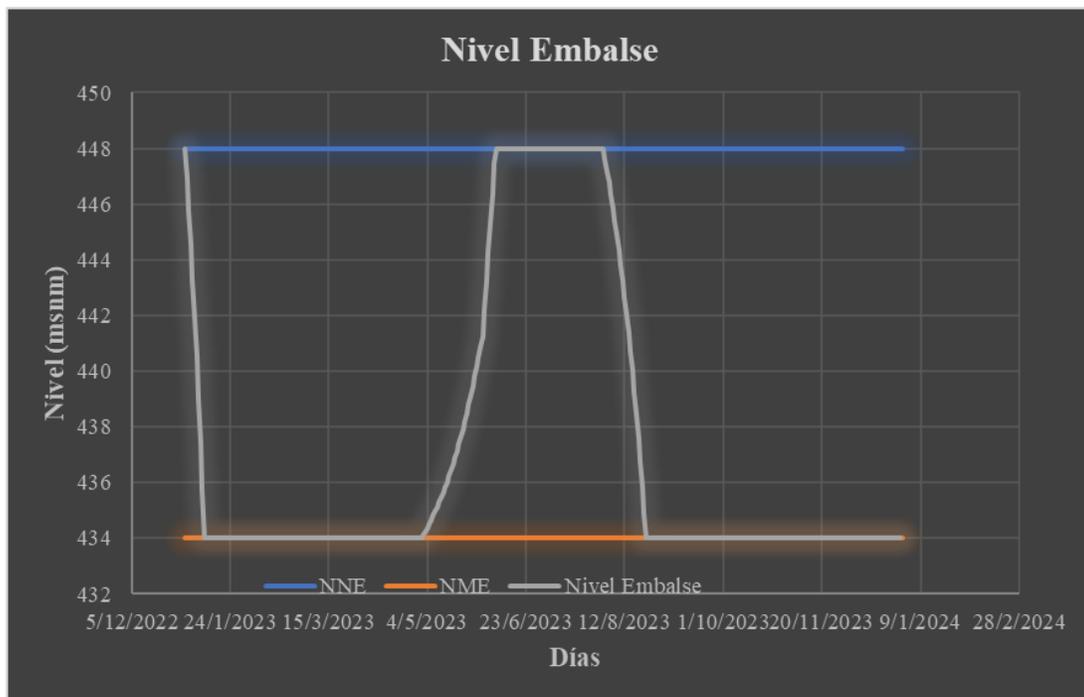
5.2.2.4 Nivel de Embalse

En la figura 33 se observa el comportamiento en cuanto a los niveles en el embalse que representa únicamente a un año promedio

La operación en el embalse inicia en la cota 448. Debido a que a principios de año existe un caudal mínimo, el nivel en el embalse disminuye hasta llegar al caso A, que es el más desfavorable para la producción de energía. De acuerdo con el hidrograma a mediados de año se observan caudales picos que son los máximos, que ayudan a regular nuevamente el embalse, logrando que este llegue al nivel normal de operación, que seguidamente decrece a causa del caudal en tránsito que es mínimo, dónde pasa por los casos C, B y finalmente al caso A poniendo al embalse en un estado crítico.

Figura 33

Gráfica de los casos en los niveles de embalse-Escenario 1



Nota. Representación de los distintos casos de nivel que se dieron en un año.

Elaborado por: La autora.

5.2.2.5 Resultados con un NMOE en la cota 434 msnm.

Tabla 15

Resumen de resultados de la simulación en la central - Escenario 1

Resultados	Valores	%
Energía Total Generada (GW - hora)	10 682	
Energía Tránsito Generada (GW - hora)	10 570	98,94%
Energía Acumulada Generada (GW - hora)	113,23	1,06%
Días con Energía Máxima Generada	0	0,0%
Días con Energía Firme Generada	5	1,4%
Días con Déficit de Energía	360	98,6%

Nota. Resultados con una en el NMOE de 434 msnm. Elaborado por: La autora.

Bajo esta premisa, en este escenario se estima una producción de energía media anual total de 10 682,39 GWh/año, en su mayoría correspondiente al caudal en tránsito en el embalse con 98,38 % de la energía total y un mínimo porcentaje de 1,06% que se le asigna a la producción de energía debido al volumen de reserva en el embalse, definida como energía acumulada (Tabla 15).

5.2.2.6 Optimización en el Escenario 1- Central hidroeléctrica Santiago

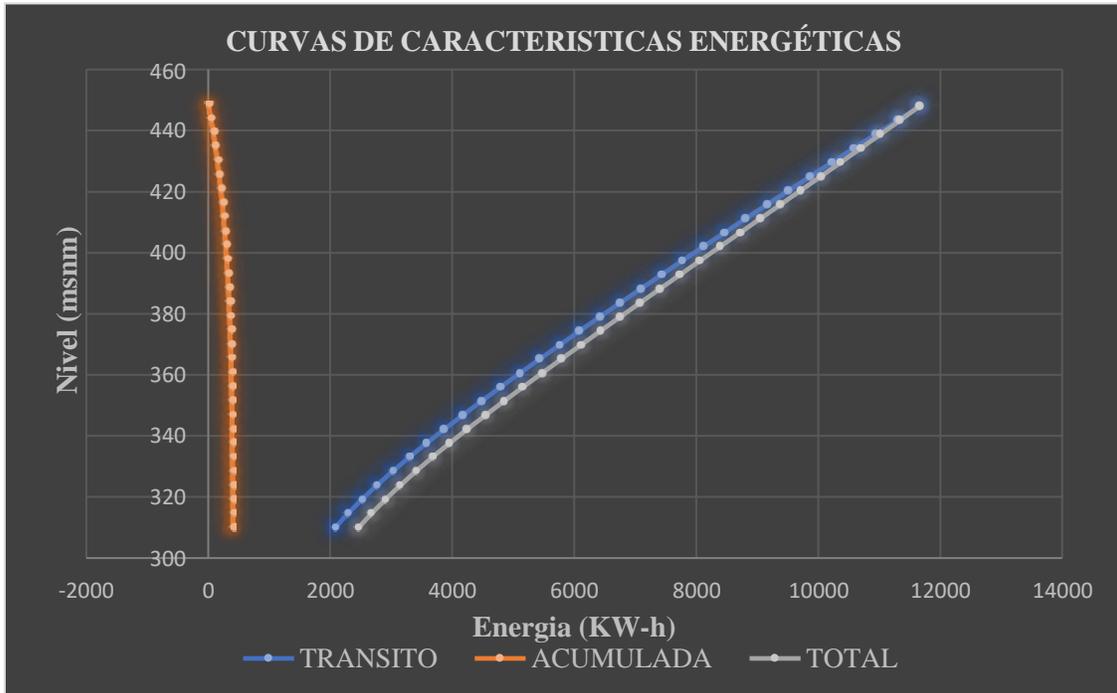
Con los resultados obtenidos de la simulación se construye las curvas de la cuantificación de energías en tránsito y acumulada, se corrió con caudales medios mínimos Q90 y se dieron los siguientes resultados:

En la curva (figura 34) se observa un incremento en la energía al subir el NMOE hasta llegar a coincidir con el NNE en la cota 448 msnm. Esto ocurre dada las condiciones en el estudio de factibilidad en la central Santiago, el cual cuenta con un vaso pequeño, por tanto, la capacidad de retención de agua en el embalse es pequeña en relación con la magnitud de los caudales. En este caso, el caudal de tránsito es utilizado para la generación de energía. Lo que hace el algoritmo

es incrementar la capacidad del embalse al subir la cota del NMOE y por lo tanto lograr una mayor producción de energía.

Figura 34

Curvas de características energéticas- Escenario 1



Nota. Energía en tránsito, acumulada y total. Elaborado por: La autora.

Tabla 16

Resumen de resultados de la simulación con NMOE optimizado - Escenario 1

Resultados	Valores	%
Energía Total Generada (GW - hora)	11 664,80	
Energía Tránsito Generada (GW - hora)	11 664,80	100,00%
Energía Acumulada Generada (GW - hora)	0	0,00%
Días con Energía Máxima Generada	0	0,0%
Días con Energía Firme Generada	0	0,0%
Días con Déficit de Energía	365	100,0%

Nota. Resultados de optimización del NMOE de 448 msnm. Elaborado por: La autora.

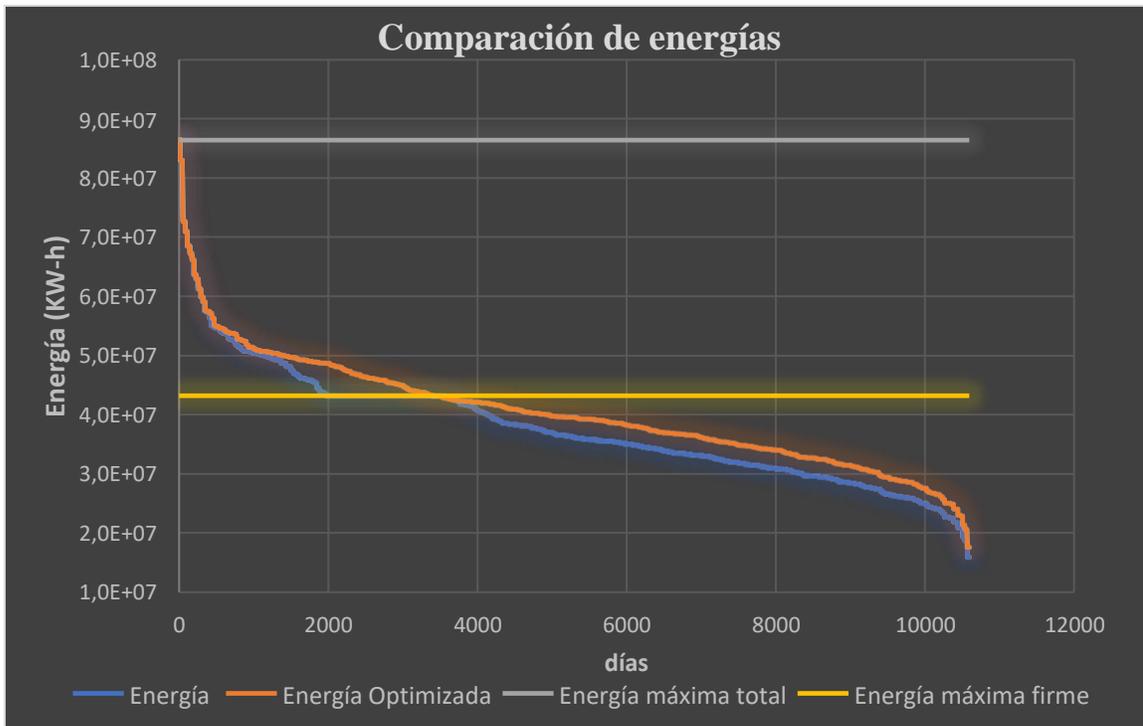
La energía media anual que se genera con un NMOE optimizado es de 11 664,8 GW-h, que significa un incremento en energía de 8,42%.

5.2.2.7 Caudales históricos

Se ha corrido en el programa para todos los datos de caudales históricos (1984-2010) con las mismas condiciones ya establecidas para este escenario 1 (Figura 35)

Figura 35

Comparación de energía con y sin optimización de caudales históricos-Escenario 1



Nota. Energía generada en los años(1984-2010), al optimizar se incrementa el 6, 03% de energía.
Elaborado por: La autora.

La producción de energía sin optimización es de 40 2639,6 GW-h con un total de 3584 días de generación de energía firme y la optimizar el nivel de embalse, la producción de energía es de 428 496,3 GW-h con un total de 3505 días de generación de energía firme. Se puede notar un

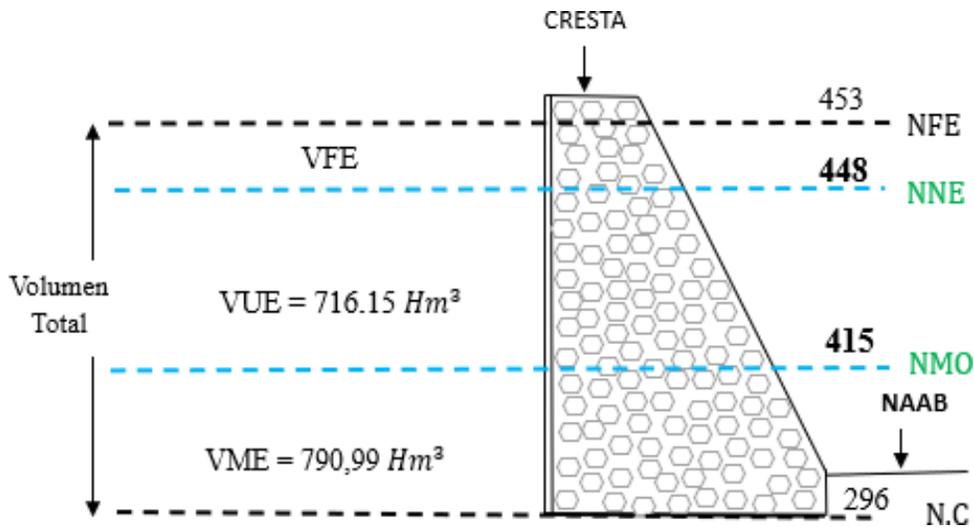
incremento de energía del 6,03% que se ve reflejado especialmente con probabilidades de superación altas.

5.3 Escenario 2

Al realizar una actualización de los diseños definitivos, se ha considerado una capacidad total instalada de 2400 MW que representa una distinción temporal para la entrada en el funcionamiento del Proyecto, con un nivel mínimo de operación ubicado en la cota 415 msnm y una eficiencia de 0,9102. Esta etapa es considerada como la primera conformada con 8 grupos de turbinas. Para la segunda etapa de construcción se añaden 4 grupos de turbinas llevando así a la central a la potencia total considerada en un inicio por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Figura 36

Representación de los niveles de embalse en el sitio del proyecto G8-Escenario 1



Nota. N.C.- nivel de cimentación de la presa; NMO.-nivel de agua mínimo de operación(NMOE); NNE.-nivel de agua máxima de operación; NFE.- nivel de agua máximo de emergencia; VFE.- volumen forzado del embalse; VUE.- volumen útil del

embalse; VME.- volumen muerto de embalse; NAAB.- nivel agua abajo. Elaborado por: La autora, obtenida de la información proporcionada por CELEC- EC (2016).

Dado el caso de que todas las obras previstas en el plan de expansión de transmisión se completen, se prevee proceder a la segunda etapa del mismo proyecto, con la instalación de 1200 MW , para completar el total provisto de 3600 MW, información obtenida del informe ejecutivo de actualización de los estudios y diseños definitivos por etapas de CELEC-EP 2021.

El nivel mínimo de operación del embalse se ubica en la cota 415 msnm (figura 36), con un volumen útil de $716,15 \text{ Hm}^3$ y la capacidad a la que llega el embalse correspondiente al volumen muerto es de $79\,099,57 \text{ Hm}^3$.

5.3.1 Datos de entrada

Para el ingreso de datos de entrada se hacen los cambios conforme a los estudios actualizados del diseño de la presa, considerada como etapa uno.

5.3.1.1 Información General

Tabla 17

Ingreso de datos de la hidroeléctrica Santiago (Escenario 2) al algoritmo

Información Central Hidroeléctrica	Ingreso de Datos
Potencia Instalada [Pins]	2400
Factor de planta [<i>a</i>]	0,5
Coeficiente de eficiencia [η]	0,9102
	Dato calculado
Potencia Garantizada [Pgar]	1200

Nota. Los datos de las potencias están en unidades de MW. Elaborado por: La autora.

Tabla 18*Datos hidro energéticos de la hidroeléctrica Santiago (Escenario 2) a la aplicación*

Información Hidroenergetica	
	Datos calculados
Energía firme [EF]	28 800 000
Energía secundaria [Es]	28 800 000
Volumen secundario máximo[VSE_max]	82,081376

Nota. Las energías están en unidades de kW-h y el volumen de generación máxima garantizada en unidades de Hm^3 . Elaborado por: La autora.

Tabla 19*Ingreso de datos de embalse de la hidroeléctrica Santiago (Escenario 2) a la aplicación*

Información del Embalse	
Niveles	Datos de Ingreso
NC	296
NNE	448
NFE	453
Nivel Inicial	448
NME	415
Volúmenes	Datos calculados
VME	790,99
VUE	716,15

Nota. Los datos correspondientes a los niveles están unidades de msnm y los volúmenes en Hm^3 . Elaborado por: La autora.

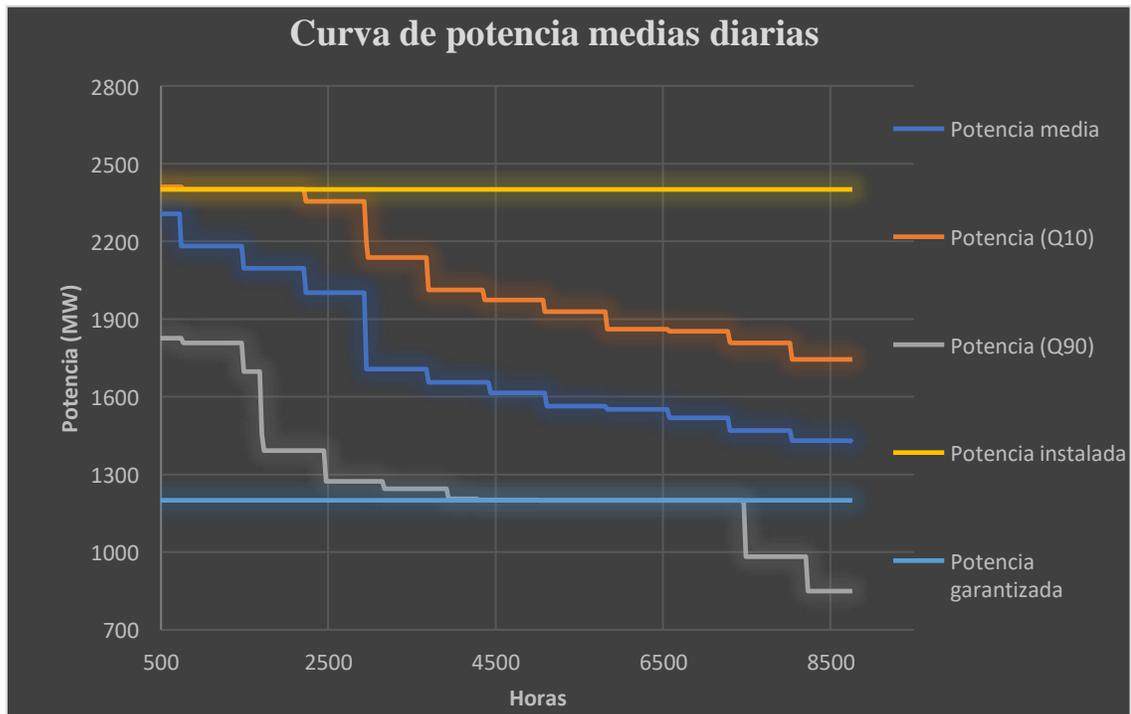
5.3.2 Resultados

5.3.2.1 Curva de duración de potencias medias diarias

Con los resultados de la simulación se construye el gráfico de duración de las potencias medias diarias (figura 37). Se obtiene para la curva de la potencia promedio un valor de 8760 horas al año de potencia garantizada, correspondiente al 100%, significando que está en una constante garantía de producción de energía.

Figura 37

Curva de duración de potencias medias diarias-Escenario 2



Nota. Los valores de las potencias están dispuestos en orden descendente en el eje de las ordenadas y en las abscisas el número de horas en el año referencial. Elaborado por: La autora.

Para los datos que corresponden a un periodo húmedo Q10 en la curva se puede observar que existen horas con producción de potencia máxima, equivalente a 2208 horas al año, que

determinan la máxima capacidad de flujo de las turbinas, que representa el 25,20 % en horas, de igual manera hay producción de potencia garantizada que sería el restante en horas igual a 6552 que representan el 74, 8%, sumando así el 100% sin existir un déficit de energía.

Para el periodo seco Q90 se observa que el valor disminuye a 7440 horas de solo generación de potencia garantizada, correspondientes al 84,93% que sigue siendo factible para la demanda de producción energética.

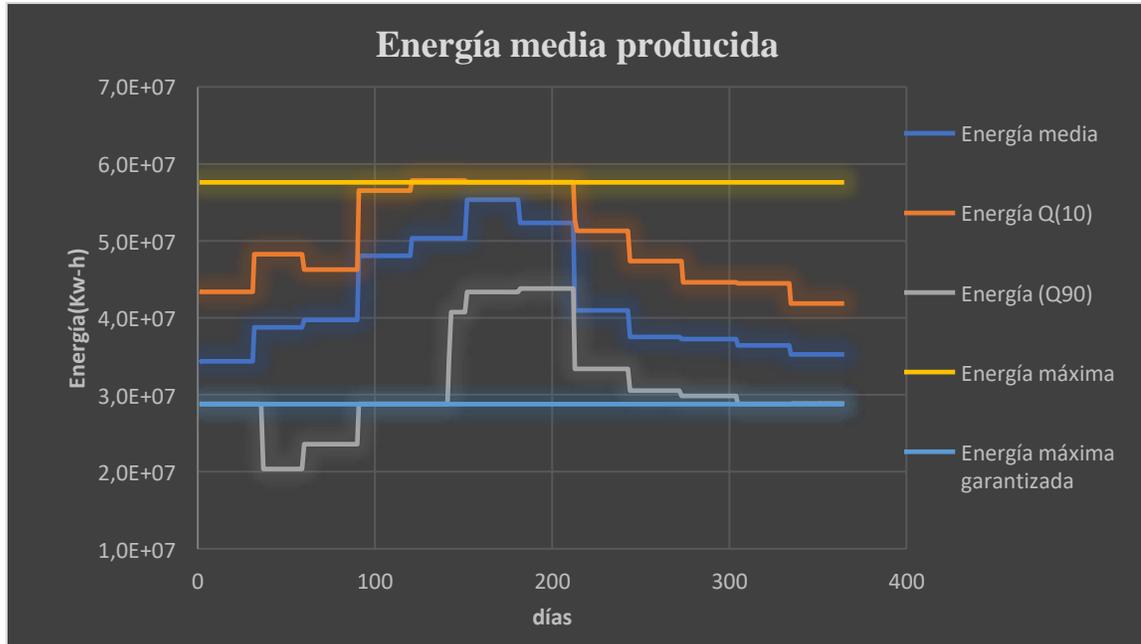
5.3.2.2 Producción de Energía

Se garantiza energía firme durante todo el año. La central hidroeléctrica durante todo el mes de junio contará con una generación de energía firme pico de 55, 346 MW-h (figura 38), y una energía mínima registrada en el mes más bajo de 34,4 MW-h, sin registrar un déficit de energía en todo el año.

En épocas de estiaje Q90, los días de producción de energía firme se reducen a 311 días y para periodos húmedos Q10 si se observa en la curva (figura 38) existe una generación de energía máxima correspondiente a 92 días en el año con una energía pico en el mes de mayo de 57,84 MW-h y el restante de días exactamente 273 son dedicados a la generación de energía firme, sin existir ningún tipo de déficit.

Figura 38

Gráfica de producción de las energías medias diaria, Q10 y Q90 - Escenario 2



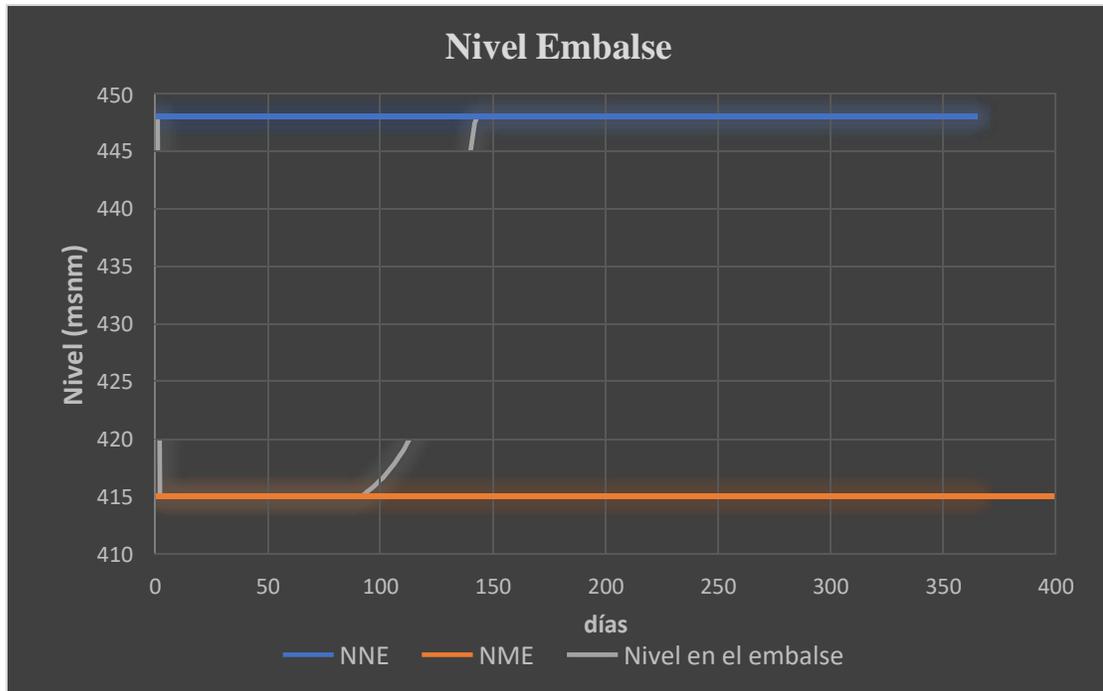
Nota. En el eje de las abscisas la escala superior el número de días de utilización en el año referencial y el eje de las ordenadas los valores de las energías. Elaborado por: La autora.

5.3.2.3 Nivel de Embalse

La operación en el embalse empieza en la cota 448 msnm, esto se debe a dato de entrada de cota inicial ingresado en el algoritmo. A partir de ello se puede observar que el nivel decrece hasta llegar al NME en el caso A (figura 39) y se mantiene ahí por un periodo de 90 días, a partir del mes de abril el nivel de agua asciende en el embalse hasta formar parte del VUE en el caso C y sigue en ascenso hasta llegar al NNE en el caso D, permaneciendo en constante oscilación con el NNE con cota 448 msnm durante 222 días.

Figura 39

Grafica de los casos en los niveles de embalse- Escenario 2



Nota. Representación de los distintos casos de nivel que se dieron en un año.

Elaborado por: La autora.

5.3.2.4 Resultados con un NMOE en la cota 415 msnm.

Tabla 20

Resumen de resultados de la simulación (Escenario 2)

Resultados	Valores	%
Energía Total Generada (KW - hora)	11 054,31	
Energía Tránsito Generada (KW - hora)	11 051,4	99,97%
Energía Acumulada Generada (KW - hora)	2,91	0,03%
Días con Energía Máxima Generada	0	0,0%
Días con Energía Firme Generada	275	75,3%
Días con Déficit de Energía	90	24,7%

Nota. Resultados en el NMOE de 415 msnm. Elaborado por: La autora.

De los resultados arrojados por el algoritmo en este escenario se estima una producción de energía media anual total de 11 054,31 GWh/año, en su mayoría correspondiente al caudal en tránsito en el embalse con 99,97 % de la energía total y un mínimo porcentaje de 0,03 % que se le asigna a la producción de energía acumulada en el embalse (Tabla 20).

5.3.2.5 Optimización en el Escenario 2- Central hidroeléctrica Santiago

La grafica se realiza a partir de la sumatoria de las energías correspondientes a tránsito y acumulada, aplicando la ecuación (e 21) se construye la curva total de las energías (figura 40), se corrió con caudales medios mínimos Q90 y se dieron los siguientes resultados:

Debido a estudios actualizados por la comisión federal de electricidad (CFE) y CELEC en los diseños definitivos, se ha hecho el análisis con una potencia instalada de 2400 MW y un aumento de capacidad en volumen útil, al disminuir el NMOE a la cota 415 msnm.

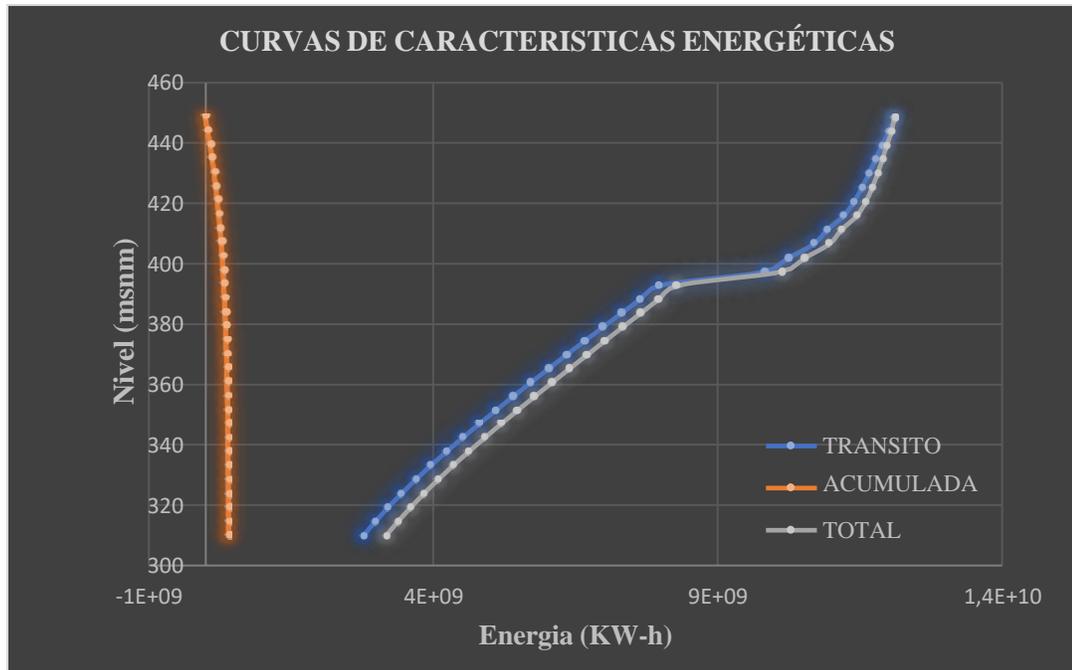
Al ser la potencia menor a lo estimado en un inicio con un volumen útil mayor, se permitió una mejor capacidad de regulación o volumen aprovechable, lo cual significa una mejora de la producción energética.

Sin embargo, el vaso sigue sin poder reservar cantidades de volumen significantes debido a caudales de entrada pequeños, dando como resultado una generación de energía acumulada casi nula, utilizando todo el caudal de ingreso para ser turbinado y poder cumplir con la alta demanda en potencia, generada por 8 turbinas.

Debido a ello se dio como resultado de la optimización del NMOE en la cota 448 msnm que coincide con el NNE, registrando un incremento en energía.

Figura 40

Curvas de características energéticas-Escenario 2



Nota. Energía en tránsito, acumulada y total. Elaborado por: La autora.

Tabla 21

Resumen de resultados de la simulación con NMOE optimizado - Escenario 2

Resultados	Valores	%
Energía Total Generada (KW - hora)	12100,71	
Energía Tránsito Generada (KW - hora)	12097,79	99,97%
Energía Acumulada Generada (KW - hora)	2,91	0,03%
Días con Energía Máxima Generada	0	0,0%
Días con Energía Firme Generada	306	83,83%
Días con Déficit de Energía	59	16,16%

Nota. Resultados de optimización del NMOE de 448 msnm. Elaborado por: La autora.

La energía media anual que se genera con un NMOE optimizado en la cota 448 msnm es de 12 100,7 GW-h, que significa un incremento en energía de 1046,4 GW-h.

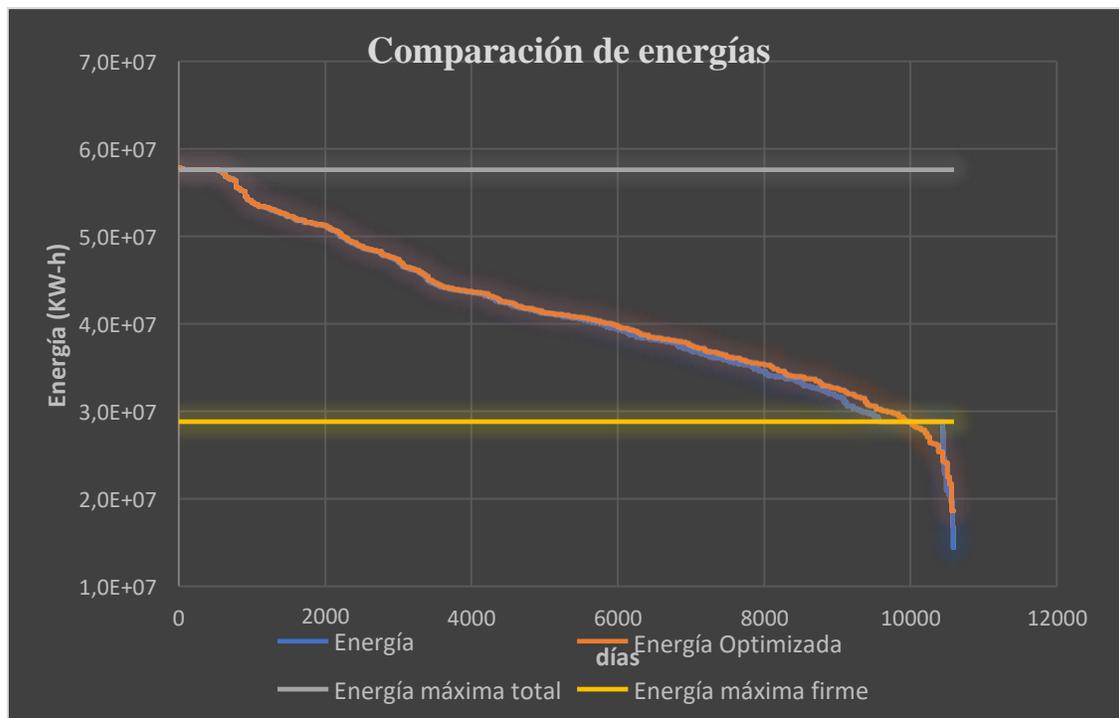
5.3.2.6 Caudales históricos

Se ha corrido en el programa para todos los datos de caudales históricos (1984-2010) con las mismas condiciones ya establecidas para este escenario 2 (Figura 41)

La producción de energía sin optimización es de 438 557,4 GW-h con un total de 10 440 días de generación de energía firme y la optimizar el nivel de embalse, la producción de energía es de 441 261,5 GW-h con un total de 10 017 días de generación de energía firme. Se puede notar un incremento de energía de 2704, 1 GW-h.

Figura 41

Comparación de energía con y sin optimización de caudales históricos-Escenario 2



Nota. Energía generada en los años(1984-2010), se observa un incremento de producción de energía del 0,62%. Elaborado por: La autora.

5.4 Caso hipotético - Escenario 3

Dadas las características particulares encontradas en el proyecto hidroeléctrico Santiago, como la preponderancia de la energía en tránsito, no se pudo evaluar el potencial de la aplicación por completo. Por este motivo la funcionalidad del algoritmo en el programa se ha probado con un escenario hipotético que tiene como condiciones el aumento de la capacidad del embalse y caudales de ingreso más bajos. En este caso se va a priorizar el uso del embalse en cuanto a su reserva en volumen, a diferencia de los escenarios anteriores en donde la energía generada fue obtenida del tránsito de caudales principalmente.

5.4.1 Datos de entrada

Para esta simulación se utilizan datos de entrada de caudales medios mensuales que se pueden ver en la siguiente tabla.

Tabla 22

Caudales medios mensuales del Escenario 3

Mes	Caudal medio mensual (m^3/s)
Enero	75,1
Febrero	84,7
Marzo	87,0
Abril	105,2
Mayo	110,3
Junio	121,5
la	114,8
Agosto	89,6
Septiembre	82,1
Octubre	81,4
Noviembre	79,6
Diciembre	77,0

Nota. Existe una reducción del 93,35% de los caudales del escenario anterior.

Elaborado por: La autora.

Los datos de entrada ingresados en la hoja de cálculo denominada **Información General**, para el escenario 3 es el siguiente:

Tabla 23

Ingreso de datos del Escenario 3 a la aplicación

Información Central Hidroeléctrica	Ingreso de Datos
Potencia Garantizada [Pgar]	250
Factor de planta [<i>a</i>]	0,5
Coefficiente de eficiencia [η]	0,87
Potencia Instalada [Pins]	500

Nota. Los datos de las potencias están en unidades de MW. Se reduje la potencia el 93, 31% con respecto a la potencia del escenario 1. Elaborado por: La autora.

Tabla 24

Ingreso de datos hidrológicos del escenario 3 a la aplicación

Información Hidrológica	Ingreso de Datos
Caudal Medio Anual	139
Curva de descarga [a]	0,68037454
Curva de descarga [b]	3,235278

Nota. Los datos del caudal están unidades de m^3/s . Elaborado por: La autora.

Tabla 25

Datos hidro energéticos del escenario a la aplicación

Información Hidroenergetica	
	Datos calculados
Volumen secundario máximo[VSE_max]	19,955
Energía firme [EF]	6 000 000
Energía secundaria [Es]	6 000 000

Nota. Las energías están en unidades de kW-h. Elaborado por: La autora.

Tabla 26

Ingreso de datos de embalse del escenario a la aplicación

Información del Embalse	Ingreso de Datos
NC	296
NNE	428
NFE	453
Nivel Inicial	428
NME	Se optimiza

Nota. Los datos correspondientes a los niveles están en unidades de msnm y los volúmenes en Hm^3 . Elaborado por: La autora.

5.4.2 Resultados

5.4.2.1 Optimización en el Escenario 3

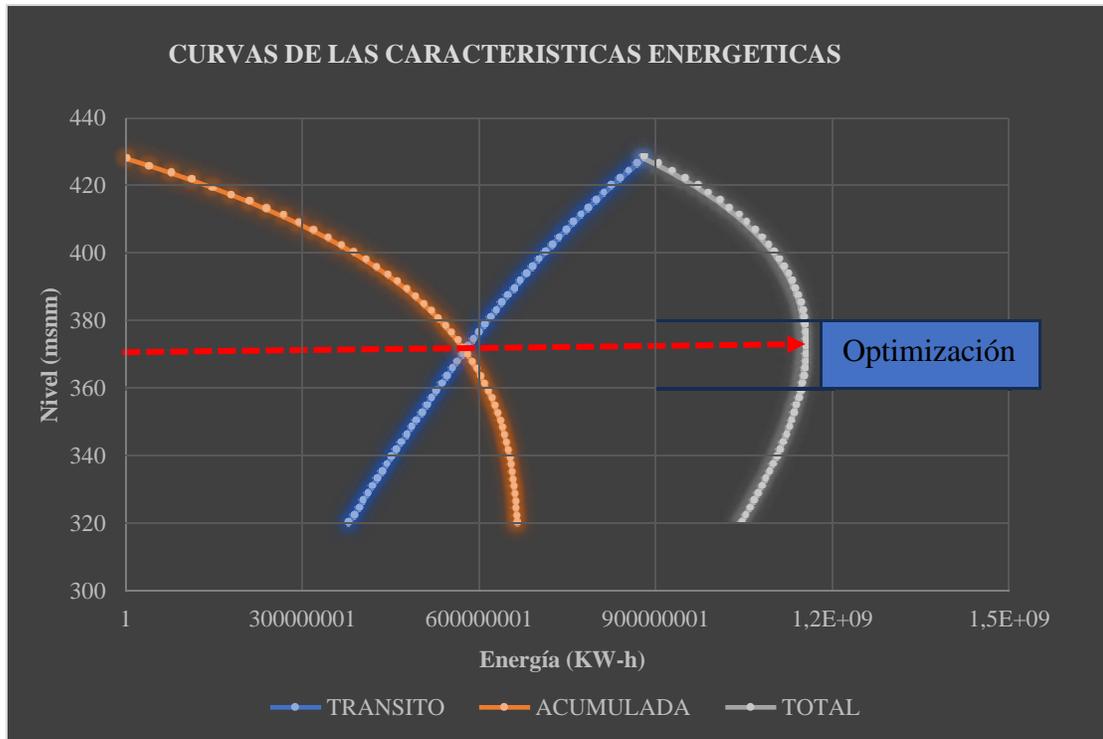
El algoritmo lo que hace es variar la cota mínima del embalse, mediante la herramienta Solver. El punto máximo en la curva de energías totales corresponde al nivel de desembalse óptimo que permite la mayor cantidad de energía producida, como resultado de optimización se obtuvo el NMOE en la cota 374 msnm con una energía máxima total de 1153,61 GW-h.

La aplicación presenta la curva correspondiente a la energía producida por el flujo en tránsito y de la energía acumulada en el embalse (figura 42).

De esto se deduce que, el embalse al tener la suficiente capacidad para retener agua ha generado energía potencial acumulada correspondiente a un valor de 589.6 GWh siendo mayor a la energía generada por el caudal en tránsito de 563,7 GWh.

Figura 42

Curva de características energéticas (Escenario 3)



Nota. En esta gráfica se puede observar la optimización en el nivel 374, dónde se da la mayor energía. Elaborado por: La autora.

5.4.2.2 Comparación de la energía diaria generada utilizando los distintos niveles mínimos de operación(NMOE)-Escenario 3

Con los resultados obtenidos de la aplicación, se ha analizado la producción de energía a nivel diario, graficando las distintas curvas correspondientes a los niveles mínimos de operación en el embalse en las cotas 324, 344, 364, 374, 394 y 424 (figura 43).

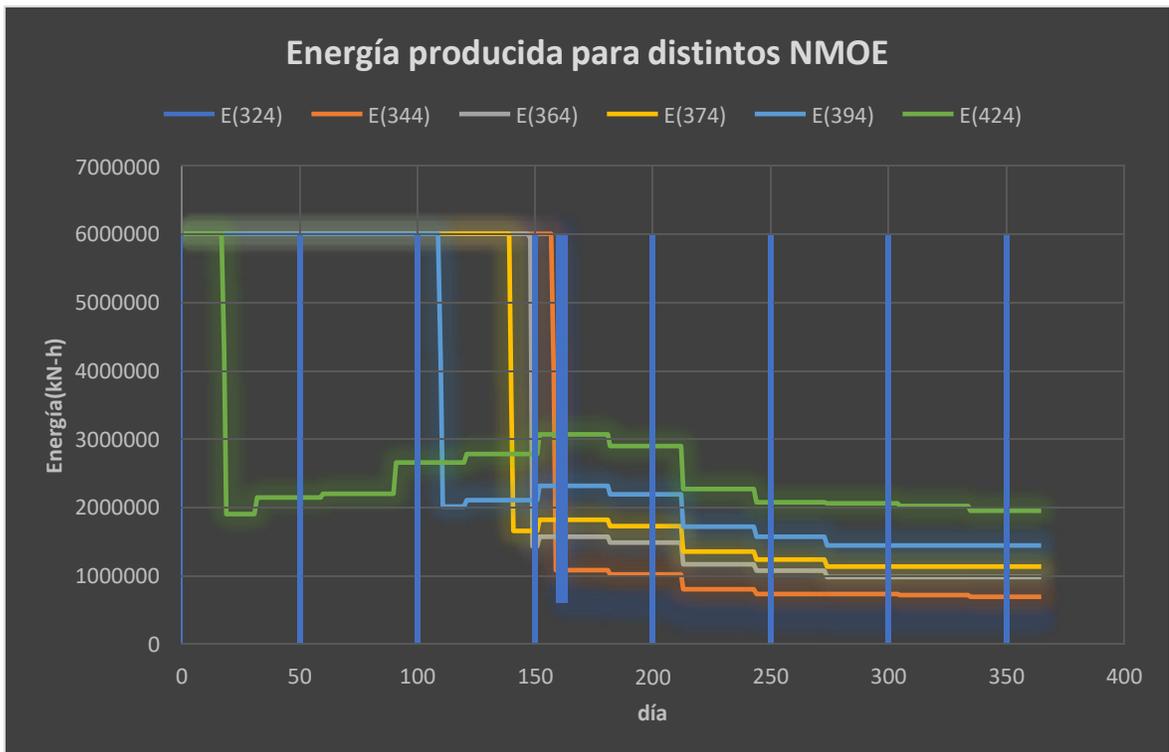
En las cotas 324, 344 y 364 los días con producción de energía firme son de 162, 158 y 149 respectivamente, a partir de ello la energía decrece considerablemente siendo su energía media menor o igual a 1 GW. Las cotas 424 y 394 tienen un menor tiempo de producción de energía firme

correspondientes a 18 y 110 días respectivamente con una energía media mayor a 1 GW. La cota 374 cuenta con una producción de energía firme de 140 días y una energía media mayor a 1 GW.

Al comparar estos resultados se deduce que en la cota 374 considerado como óptimo, tiene un amplio intervalo de tiempo en el que se genera energía firme y su energía media es mayor a 1 GW obteniendo una energía total mayor en comparación a las demás cotas.

Figura 43

Comparación de la energía diaria generada utilizando los distintos niveles mínimos de operación(NMOE)-Escenario 3



Nota. En la gráfica se observa las energías producidas en los NMOE en las cotas (324, 344, 364,374,394, 424) respectivamente. Elaborado por: La autora.

CONCLUSIONES

En este proyecto se elaboró una aplicación en donde se utiliza un algoritmo que utiliza ecuaciones que gobiernan la simulación de la operación de un embalse, así como las restricciones y condiciones que lo afectan. Se toma como datos de entrada información de los caudales afluentes a la cuenca, la capacidad del embalse con sus respectivos niveles, caudal de descarga y características hidroenergéticas de la central y se obtiene como resultado la producción de energía en tránsito y de energía potencial acumulada. En la modelación se utilizó el complemento Solver de la aplicación Excel, que encuentra el nivel óptimo a una cota donde se dé la máxima producción de energía

El algoritmo se limitó al estudio de cinco casos posibles que se pueden presentar en el embalse. Cada caso representa el emplazamiento de agua, dependiendo del nivel al que llega en el embalse incluyendo niveles mínimos debido a condiciones hidrológicas secas y niveles máximos en caso de desbordamiento, considerado condiciones hidrológicas húmedas.

Para la aplicación del algoritmo se ha utilizado como ejemplo al Proyecto hidroeléctrico Santiago, analizando dos posibles escenarios propuesto por CFE. En los resultados del primer escenario con una potencia instalada de 3600MW, se obtuvo déficit de energía, significando que la central a esa potencia no pueda cumplir con las demandas en producción energética, debido al ingreso de caudales relativamente bajos y con un volumen útil en el vaso con poca capacidad, todo el volumen de ingreso al embalse para ser turbinado, dando como resultado una generación de energía potencial acumulada nula.

En el escenario 2 se trabaja con datos actualizados del Proyecto Hidroeléctrico Santiago. Debido a la magnitud del proyecto se consideró en primera instancia una potencia de 2400 MW y una capacidad del volumen útil mayor. Se analizó para caudales medios Q_m y húmedos Q_{10} en

los cuales no se registró déficit de energía firme, sin embargo, la capacidad en el vaso es pequeña, imposibilitando el almacenamiento de agua en el reservorio, dando paso a la generación de energía solo en tránsito.

Se ha probado el algoritmo usando distintos escenarios, con distintas condiciones y en todos los casos se llegó al objetivo de maximizar la energía. Esto respalda su utilidad y aplicabilidad en la optimización de centrales hidroeléctricas con embalse, lo que representa un paso importante hacia una gestión más eficiente y sostenible de los recursos energéticos.

RECOMENDACIONES

Para el análisis de otros proyectos, se recomienda incluir la influencia del caudal ecológico en el modelo de optimización. En este proyecto no se concibe este caudal debido a que es una central a pie de presa, sin embargo, para futuros proyectos es completamente justificable este diseño. Una buena estimación es considerar el caudal ecológico igual al 10% del caudal medio interanual.

Se recomienda utilizar las sugerencias que calcula la aplicación como límites entre el nivel aguas abajo y el nivel agua arriba para la operación en el embalse. Estas sugerencias se encuentran en el módulo de información general, al momento de ingresar los datos de entrada del nivel mínimo de operación en el embalse.

Se sugiere utilizar la aplicación para la simulación de operación en el embalse. No solo sirve para casos de optimización, si no que se puede observar resultados con base al funcionamiento en el embalse.

Se sugiere utilizar esta herramienta para proyectos a nivel de prefactibilidad, debido a que, durante la etapa inicial de un proyecto, se busca evaluar la viabilidad técnica del proyecto antes de tomar decisiones más definitivas en la fase de desarrollo. Esta herramienta proporciona una visión más clara de la energía generada en base a las características del proyecto en estudio.

Se sugiere que se utilice la aplicación con caudales a nivel diario, para una evaluación más completa y precisa de la disponibilidad y comportamiento del agua en los niveles de embalse.

Para embalses con características constructivas pequeñas, será necesario se opere el embalse en un intervalo de tiempo más corto. Debido a que es posible la aplicación no funcione para circunstancias de este tipo.

Sería importante incorporar a la aplicación el cálculo de volúmenes excedentes, para una mejor estrategia en la operación del embalse, considerando la seguridad en la presa.

REFERENCIAS

- Araque, Miguel. V. M. (Eds.). (2019). *Cuencas hidrográficas*. Editorial Abya-Yala Quito-Ecuador.
- <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19038/1/Cuencas20hidroficas.pdf>
- ARCONEL(2015). Regulación No. Arconel-005/15. *El directorio de regulación y control de electricidad*. Ecuador. Obtenido de:
- https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-10/Documento_Regulacion-No.-ARCONEL-005-15.pdf
- Blas, G (2018). *Improved sophomore experiment to measure latent heat of fusion*. Am. J. Phys. 35 (1967) pp. 23-26.
- Calero, J. (2021). *Centrales Hidroeléctricas-Bases de hidro energética*. Material teórico vistos en el itinerario hidráulica. Quito.
- CELEC EP. (2011). Cuencas y subcuencas hidrográficas. *Caracterización y diagnóstico del área referencial del PHS (línea base)*.Capitulo 5. Quito. Obtenido de:
- <file:///Downloads/5.1-LINEA-BASE-AREA-3-V5.pdf>
- CELEC EP. (2016). *Proyecto Hidroeléctrico Santiago (PHS) con una potencia de 3600 MW*. *Resumen ejecutivo*. Quito. Obtenido de:
- http://acotecnic.com/wp-content/uploads/2016/01/RESUMEN-EJECUTIVO-EIAD-PHS_V1.pdf
- CELEC EP. (2021a). *Actualización de los estudios y diseños definitivos del Proyecto Hidroeléctrico Santiago para su construcción por etapas*. Informe ejecutivo de diseños definitivos. Lombardi. Quito. Obtenido de:
- <https://www.celec.gob.ec/images/comunicacion/Resumen20ejecutivo.pdf>

- CELEC EP. (2021b). *CELEC EP genera y transmite energía eléctrica limpia que consume el país y exporta a los países vecinos*. Ecuador. <https://www.celec.gob.ec>
- Córdova, J. (2015). *Diseño de embalse teniendo en consideración los impactos ambientales*. [Tesis de pregrado en Ingeniería Civil, Piura]. https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2387/ICI_219.pdf
- Guevara, M. (2000). *Embalses*. En Estructuras Hidráulicas (págs. 1-31). http://www.academia.edu/7223828/Obras_hidraulicas._Embalses
- González, M (2011). *Saltos hidroeléctricos: conceptos básicos y aplicaciones*. Editorial Delta Publicaciones. (pp-68-75).
- MERNNR (2018). *Plan estratégico institucional 2019-2021*. Ministerio de energía recursos naturales no renovables. Ecuador. Obtenido de <https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2019/02/Plan-Estrategico-Institucional-2019-2021-MERNNR.pdf>
- Microsoft Corporation© (2017). *Load the Solver Add-in in Excel*. Esxcel for ;icrosoft 365 for MAC. Obtenido de : <https://support.microsoft.com/en-us/office/load-the-solver-add-in-in-excel-612926fc-d53b-46b4-872c-e24772f078ca>
- Ochoa, A. (2013). *Determinación de la potencia óptima del proyecto hidroeléctrico río Santiago (G8) basado en la evacuación técnica y financiera aplicando criterio de optimización y simulación estocástica multivariable*. [Trabajo de graduación de magister, Universidad de Azuay]. Departamento de Posgrados. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/3200/1/09974.pdf>
- OLADE (1980). *Panorama energético de América Latina*. Organización latinoamericana de energía. Imprenta Mariscal. Quito.

- Ordóñez, J. (2015). *Determinación de la respuesta hidrológica de la subcuenca alta del río Zamora*. Loja
- Ortiz, R. (2011). *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. Ediciones de la U. Bogotá. (pp.311).
Obtenido de : <https://bibliotecas.ups.edu.ec:3488/es/ereader/bibliotecaups/70972>
- Ramírez, L (2022). *Minicentrales hidroeléctricas*. Manuales de energías Renovables. Madrid
Obtenido de:
https://www.idae.es/uploads/documentos/Minicentrales_hidroelectricas_125.pdf
- Sandoval, W. (2018). *Presas y Embalses*. En universidad de las fuerzas armadas ESPE (Edición 1). Principios de las centrales hidroeléctrica (pp.3-28). Editorial Sector público Gubernamental
- Sánchez, U (2019). *Maquinas Hidráulicas*. Editorial Club Universitario. San Vicente.Obtenido de:
<https://www.g/books/edition/419&gbpv=1&dq=turbinas+libro&printsec=frontcover>
- Sanz Osorio, J. F. (2016). *Energías renovables energía Hidroeléctrica (2da ed.)*. Editorial Prensas Universitarias en Zaragoza.(pp. 36-39) Obtenida de:
<https://bibliotecas.ups.edu.ec:3488/es/ereader/bibliotecaups/44824>
- Torres, A. (2016). *Análisis de factibilidad energético-financiero del Proyecto Zamora Santiago G8*. [Tesis de Ingeniero eléctrico. Escuela politécnica nacional del Ecuador].EPN.<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16929/1/CD-7510.pdf>
- Vargas, L., Haas, J., Reyes, L., Salinas, F., Morata, D. (2020). *Energía eléctrica con fuentes renovables*. Editorial Universitaria Santiago de Chile.
- Vinueza, M., Coloma, W., Vargas, C. (2003). *Simulación de la operación del embalse de la central hidroeléctrica Marcel Laniado de Wind*. [Trabajo de graduación de

ingeniero en electricidad, Escuela Superior Politécnica del Litoral del Ecuador]
ESPOL.

<http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/3175/1/5693.pdf>

Zarza, L. (2019). *El Ciclo del agua*. Fundación para la conservación del agua de la región metropolitana de Guatemala. Secretaria del medio ambiente y recursos naturales Obtenido de: <https://funcagua.org.gt/wp-content/uploads/2020/04/B3dulo-1-el-ciclo-del-agua.pdf>.

Zhelezniakov, G. Negovskaya, T. y Ovcharov, E. (1984). *Hidrología y regulación de escorrentía*. Moscú, Rusia. Editorial Kolos.

ANEXOS

ANEXO A

DIAGRAMA DE FLUJO

5.4.3 Leyenda del diagrama de flujo

NNE- Nivel normal de embalse

NME- Nivel muerto de embalse

NFE- Nivel forzado de embalse

VUE- Volumen útil de embalse

VME- Volumen muerto de embalse

P_{INS}- Potencia instalada

P_{GAR}- potencia garantizada

NE_(i-1) – Nivel de embalse al final del día i-1

H_(i-1) –Carga de la central al final del día i-1

V_{ES(max)}- volumen requerido para producir la máxima energía secundaria mensual

Q_i - caudal que ingresa el día i

V_i- Volumen de agua que ingresa el día i

V_{DISI}- Volumen de agua disponible en el día i

V_{ETi}- volumen total de agua en el embalse en el día i

H_i- Carga de la central en el día i

h_o- profundidad del agua aguas abajo de la central (curva de descarga)

H Carga media de la central en el día i

Q_{Fi} - caudal para generar la potencia garantizada (máxima energía firme en el día i)

V_{Fi} - Volumen de agua para generar la máxima energía firme en el día i

E_i - energía generada en el día i

E_{TRI} - Energía de tránsito en el día i

E_{Ai} - Energía acumulada utilizada en el día i

ΣE_i - Sumatoria de la energía mensual generada hasta el día i

ΣE_{Tri} - Sumatoria de la energía de tránsito mensual hasta el día i

ΣE_{Ai} -sumatoria de la energía acumulada utilizada hasta el día i

∇o - Cota del fondo del río en el eje vertical de la turbina

V_{GENi} Volumen de agua disponible para generar en el día i

Q_{GENi} - Caudal disponible para generar en el día i

V_{Fi} - Volumen de agua requerido para generar energía firme en el día i

ΔV_i - Diferencia entre el volumen disponible para generar y el volumen utilizado para generar energía firme.