



REVISTA INGENIO

Evaluación de la Técnica de Algoritmos Genéticos para la Optimización Multi-Objetivo del Dimensionamiento de una Chimenea de Equilibrio Superior Sección Constante y su Ramal de Unión en un Aprovechamiento Hidroeléctrico

Evaluation of the Genetic Algorithms Technique for the Multi-objective Optimization of the Sizing of a Constant Section Surge Tanks and its Junction Branch in a Hydroelectric Power Plant.

Gabriela del Cisne Bravo Ureña |  Escuela Politécnica Nacional - EPN, Quito, Ecuador

Recibido: 27/7/2024

Recibido tras revisión: 30/9/2024

Aceptado: 5/11/2024

Publicado: 03/01/2025

PALABRAS CLAVE

Algoritmos genéticos, central hidroeléctrica, método de las características, multiobjetivo, chimenea de equilibrio, ramal de unión.

KEY WORDS

Genetic algorithms, hydroelectric power plant, method of characteristics, multi-objective, surge tanks, junction branch.

RESUMEN

Este proyecto presenta la aplicación de un algoritmo genético utilizado en el mejoramiento de un sistema hidroeléctrico (sistema de embalse, túnel, chimenea de equilibrio superior, tubería de presión y turbina), utilizando diversas variables hidrodinámicas (flujo transitorio, velocidad de propagación de onda, fenómenos transitorios) y económicas, para alcanzar una optimización de la geometría de la chimenea de equilibrio superior y su ramal de unión. Se desarrolló un programa utilizando el software Matlab por el método de las características para el desarrollo de un modelo numérico unidimensional en una central hidroeléctrica, cuyos resultados fueron las variaciones de la carga piezométrica y caudal al existir un evento transitorio. Aplicando un código para el uso de algoritmos genéticos y utilizando las variables de la función objetivo y parámetros a optimizar, como son el diámetro del ramal de unión y el diámetro de la chimenea de equilibrio, se obtuvieron tres soluciones para el diseño de la chimenea, cada solución se analizó en función de su geometría y costo de construcción. El diseño final cumple con los requisitos técnicos y se integra adecuadamente al entorno. Para comprobar la funcionalidad del programa se realizó el análisis, comparación y comprobación en diez centrales hidroeléctricas, con sus principales parámetros que son el diámetro del ramal de unión, costo de construcción por unidad monetaria y la oscilación, dando como resultados diferentes soluciones, dependiendo de las características iniciales de cada una de las centrales hidráulicas analizadas.

ABSTRACT

This project presents the application of a genetic algorithm used in the improvement of a hydroelectric system (reservoir system, tunnel, upper equilibrium chimney, pressure pipe, and turbine), utilizing various hydrodynamic (transient flow, wave propagation speed, transient phenomena) and economic variables, to achieve optimization of the geometry of the upper equilibrium chimney and its connection branch. A program was developed using Matlab software by the method of characteristics to create a one-dimensional numerical model in a hydroelectric power plant, with results showing variations in piezometric head and flow during a transient event. By applying a code for genetic algorithms using the variables of the objective function and parameters to optimize, such as the diameter of the connection branch and the diameter of the equilibrium chimney, three solutions for the chimney design were obtained, each analyzed based on its geometry and construction cost. The final design meets technical requirements and integrates well with the environment. To verify the functionality of the program, an analysis, comparison, and validation were performed on 10 hydroelectric power plants, using their main parameters, including the diameter of the connection branch, construction cost per monetary unit, and oscillation, resulting in different solutions depending on the initial characteristics assigned to each of the analyzed hydraulic plants.

I. INTRODUCCIÓN (BASE TEÓRICA)

Un **aprovechamiento hidroeléctrico** es un sistema de obras hidrotécnicas, que permiten la generación de energía limpia para el desarrollo de todo tipo de actividades económicas. Dados los altos costos de inversión que representa la conceptualización, diseño, construcción, supervisión y puesta en marcha de este tipo de proyectos, es transcendental desarrollar metodologías que permi-

tan la optimización de la geometría de los componentes de estos sistemas hidroeléctricos [1], involucrando métodos numéricos y técnicas innovadoras de amplia aplicabilidad en ingeniería.

Un esquema típico de un aprovechamiento hidroeléctrico de mediana y gran potencia, describe a un sistema en donde toda la conducción se encuentra totalmente

presurizada, desde el sitio de captación hasta la casa de máquinas. Esta tipología de aprovechamiento, normalmente asocia la presencia de obras subterráneas como túneles, pozos de carga, tuberías enterradas, cavernas, entre otras [2]. Estas estructuras encarecen los proyectos, motivo por el cual deben optimizarse técnica y económicamente, tomando en consideración todos los procedimientos de operación de una central hidroeléctrica.

El **análisis de flujo no permanente** en un aprovechamiento hidroeléctrico, permite estimar la variación de la carga piezométrica y caudal en el dominio espacio (x) - tiempo (t). En función de la variación de estos parámetros hidrodinámicos, se debe buscar las formas y/o dispositivos para atenuar los efectos de este flujo transitorio y prevenir afectaciones a la conducción del sistema; elemento que regularmente suele ser el más costoso de todo el proyecto [3]. Los dispositivos o estructuras que brindan mayores prestaciones para la atenuación del golpe de ariete generado en un aprovechamiento hidroeléctrico son las chimeneas de equilibrio, en donde los efectos del transitorio son sobrellevados mediante una oscilación de masa.

El dimensionamiento de una chimenea de equilibrio superior conlleva al análisis del flujo transitorio en todo el sistema hidroeléctrico, en donde se deben determinar las conducciones con sus propiedades elásticas, el fluido con su módulo de compresibilidad y la variación de caudal en el sistema. Posteriormente, se define la geometría de la chimenea de equilibrio y su ramal de unión, realizando un proceso iterativo en el cual se analizan varios escenarios de operación de la central [4]. Este proceso tiene por objeto optimizar la geometría de la chimenea de equilibrio y su ramal de unión, ajustándose generalmente a un procedimiento manual prueba-error hasta cumplir con las condiciones impuestas por el diseñador.

Todo este proceso debe ser ordenado y compilado en una metodología que permita emplear menores tiempos en el dimensionamiento de una chimenea de equilibrio. Por esta razón se planteará una metodología que involucre la resolución del flujo transitorio en un sistema embalse - túnel - chimenea - tubería de presión - turbinas, mediante el método de las características, para obtener la variación del caudal y carga piezométrica en el tiempo y espacio. Posteriormente se ejecutará una optimización multiobjetivo utilizando la técnica de algoritmos genéticos (AG), en donde se involucren la mayoría de los parámetros hidrodinámicos, de diseño civil y económicos, a fin de obtener una geometría adecuada de una chimenea de equilibrio superior.

La **velocidad de propagación de onda** es la relación entre un espacio recorrido igual a la longitud de onda y el tiempo que se demora en recorrerlo; una onda es la variación de flujo que se puede presentar en un cambio de caudal o en la elevación de la superficie de agua, en cambio la celeridad de onda indica la velocidad con la cual esa variación se mueve a lo largo del canal [5].

Los **fenómenos transitorios** son anomalías ocasionados por la variación de presiones en las conducciones a presión, estos fenómenos pueden ocasionar grandes daños en los sistemas de tuberías encargadas del transporte de agua, es por eso que se los estudia en un régimen transitorio o modelo elástico, con el fin de anticipar matemáticamente los efectos producidos por el golpe de ariete, las sobrepresiones y subpresiones que pueden ocasionar el daño o ruptura de la tubería.

El **aprovechamiento hidroeléctrico** es una serie de instalaciones vitales para transformar la energía potencial de un curso de agua en energía eléctrica, procedimiento que permite aprovechar la energía potencial presente en el agua convirtiendo, primero, en energía cinética, a continuación, en energía mecánica de rotación de la turbina, y finalmente en energía eléctrica.

Se considera como un **embalse** a un depósito de agua que está compuesto por una cuenca alimentadora, un terreno natural donde se almacenará el agua y una estructura de contención que resistirá la presión del agua o presa; antes de crear este embalse es necesario definir cuál será la necesidad que este va a satisfacer, esto será una pauta para conocer el tamaño, ubicación y volumen de agua que se utilizará. Una vez determinados estos parámetros, se estudiará la cuenca y las posibilidades que esta tiene para proporcionar el agua, por lo tanto, un embalse será el resultado de la construcción de una represa en un terreno natural que encerrará el cauce de un río permitiendo almacenar cierto volumen de agua para satisfacer las demandas de una población.

Un **túnel de presión** servirá de paso y conducción para caudales turbinados, reduciendo la longitud de desarrollo de los canales de conducción, mediante una obra de toma y bajo la protección de rejillas, se alimenta al túnel de presión, evitando el ingreso de basura, peces, etc. Esta obra de toma se ubicará por encima del nivel donde se encuentra basura o algo que pueda obstruir el embalse.

Las **chimeneas de equilibrio superior**, también llamadas pozos de oscilación o torres piezométricas, "Son estructuras complementarias a infraestructuras que trabajan con agua y cuyo objetivo es servir de amortiguador a sobrepresiones y subpresiones del canal" [6].

La **tubería de presión** se encarga de transportar el agua desde la captación hasta las turbinas, soportando grandes presiones [7]; el caudal, la altura neta, la velocidad del agua, las pérdidas de carga y presión son las principales características que influyen en el funcionamiento de esta tubería [8].

El objetivo principal de una **turbina** es transformar la energía hidráulica en energía mecánica que, trabajando juntamente con un generador, se convertirá en energía eléctrica, siendo esta una pieza importante dentro de una central hidroeléctrica. El tipo de turbina a utilizar depende directamente de la altura del salto y de la cantidad de agua o caudal que la central proporcione para generar

energía hidráulica, por eso se tiene dos tipos de turbinas: de acción y de reacción [9].

Dentro de este **ramal de unión** con la conducción se explica el concepto de chimenea de orificio, es necesario que el control de la presión máxima que pueda generarse en el orificio no exceda a la carga máxima que se produce debido a la oscilación [3].

El **método de las características** es un procedimiento que sirve para resolver los modelos dinámicos elásticos, se lo utiliza para el análisis de flujo no permanente en las tuberías, ya que a través de esta técnica se puede analizar fácilmente la introducción de diferentes condiciones y consideraciones de borde, es un método muy utilizado en la resolución de modelos dinámicos elásticos.

Cuando se analiza un flujo transitorio, se pretende obtener la solución para conocer completamente las funciones que determinan las presiones y velocidades en cualquier punto de la conducción y en cualquier instante de tiempo.

Es necesario partir de la ecuación de continuidad, en forma diferencial, para realizar el balance diferencial de masa, de esta forma se obtiene la Ecuación de continuidad:

$$\frac{g}{a^2} \frac{dH}{dt} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{g}{a^2} V \operatorname{sen} \theta = 0 \quad (1)$$

Luego se analiza el balance diferencial de fuerzas, que se efectúa a partir de la ecuación de la cantidad de movimiento, en forma diferencial, resultando la ecuación:

$$\frac{dv}{dt} + f \frac{v|v|}{2D} + g \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

Donde:

a = Celeridad de la onda de presión.

$\frac{\partial H}{\partial t}$ = Altura piezométrica en función del tiempo.

$\frac{\partial v}{\partial x}$ = Velocidad en función del espacio (longitud)

$\frac{\partial Q}{\partial t}$ = Caudal en función del tiempo.

V = Velocidad.

θ = Grado de inclinación de la tubería.

$\frac{dv}{dt}$ = Velocidad en función del tiempo.

f = Factor de fricción adimensional de Darcy.

D = Diámetro de la tubería.

$\frac{\partial H}{\partial x}$ = Altura piezométrica en función del espacio (longitud).

A = Área de la tubería.

Q = Caudal.

La Ecuación de continuidad (ver Ecuación 1) y la Ecuación de cantidad de movimiento (ver Ecuación 2) se deben colocar en función del caudal con relación a la velo-

cidad, luego, mediante integración numérica, se obtiene el sistema de ecuaciones que representan las características positiva y negativa.

Las condiciones de contorno son las modificaciones de la presión en el sistema en el tiempo y espacio, son representadas por la *Ecuación 1* y la *Ecuación 2*; para resolver es necesario conocer los componentes del sistema hidráulico (depósitos, cambio de diámetro de tuberías, bombas, válvulas) y sus propiedades; otras expresiones más utilizadas son en función de las variables H y Q , que modelan el comportamiento de dicho punto, frente a cambios en sus propiedades iniciales.

El **algoritmo genético (AG)** es una técnica de programación que utiliza una evolución biológica para la resolución de problemas [10]. Una vez planteado un algoritmo genético, la entrada de este es un conjunto de soluciones potenciales que se presentarán en ese problema codificados de cierta manera y mediante la función aptitud, permitiendo una evaluación cuantitativa a cada parámetro o candidato, cada candidato son posibles soluciones que funcionarán con el objetivo de mejorar el algoritmo genético.

Estos algoritmos son una familia de procedimientos basados en modelos de cambios genéticos para cierta población de individuos [12], mediante una selección natural se combina la supervivencia de cada secuencia mejor adaptada con cambios aleatorios de información, los organismos genéticos son algoritmos de búsqueda [11].

El funcionamiento de un algoritmo genético se asemeja al proceso de evolución en la naturaleza, y consta de varios componentes clave:

- **Población inicial:** Se crea una población inicial de posibles soluciones al problema que se está tratando de resolver. Estas soluciones se representan de manera genérica.
- **Función de aptitud (fitness):** Se define una función de aptitud que evalúa cuán "buena" es cada solución en la población. Esta función asigna un valor numérico a cada solución basado en su capacidad para resolver el problema. Cuanto mayor sea la aptitud, mejor será la solución.
- **Selección:** Se seleccionan soluciones de la población actual para crear una nueva generación. Las soluciones con una aptitud más alta tienen una mayor probabilidad de ser seleccionadas, pero las soluciones menos aptas también tienen una pequeña probabilidad de ser elegidas, lo que permite una exploración más amplia del espacio de búsqueda.
- **Cruzamiento (crossover):** Las soluciones seleccionadas se combinan entre sí mediante operaciones de cruzamiento, que mezclan partes de las soluciones parentales para crear nuevas soluciones. Esto simula la recombinación genética en la biología.
- **Mutación:** Ocasionalmente, se introduce un pequeño grado de cambio aleatorio en las soluciones resultantes

mediante la mutación. Esto ayuda a introducir diversidad en la población y evita que el algoritmo quede atrapado en óptimos locales.

- **Evaluación de la terminación:** Se evalúa si se ha alcanzado algún criterio de terminación, como un número máximo de generaciones o una solución lo suficientemente buena.

- **Reemplazo:** La nueva generación reemplaza a la generación anterior, y el proceso se repite hasta que se cumpla el criterio de terminación.

1.1. TRABAJOS RELACIONADOS

Tabla 1.

Artículos, libros o referencias más utilizados en la investigación

ARTÍCULO	ASPECTOS IMPORTANTES	RESULTADOS OBTENIDOS
Design-Variable Optimization of Hydropower Tunnels and Surge Tanks Using a Genetic Algorithm. Journal of Water Resources Planning and Management. [13].	<p>El objetivo principal es maximizar la eficiencia y la funcionalidad de estos componentes en el contexto de proyectos de energía hidroeléctrica.</p> <p>Los autores proponen un enfoque que se basa en la simulación de computadora y la evaluación de múltiples escenarios para determinar las configuraciones óptimas</p> <p>El proceso de optimización implica la definición de un conjunto de variables de diseño que afectan el rendimiento de los túneles y tanques de sobrepresión. Luego se utiliza un algoritmo genético para explorar y evaluar una variedad de combinaciones posibles de estas variables.</p>	<p>Contribuye al campo de la planificación y gestión de recursos hídricos al ofrecer un enfoque práctico para optimizar la infraestructura clave en proyectos de energía hidroeléctrica.</p> <p>Los resultados de la optimización proporcionan pautas valiosas para mejorar el diseño y la eficiencia de túneles y tanques de sobrepresión, lo que puede tener un impacto significativo en la producción de energía y la gestión de recursos hídricos en general.</p>
Fuzzy genetic algorithm approach for optimization of surge tanks. Scientia Iranica [11].	<p>Se centra en el uso de un enfoque que combina algoritmos genéticos y lógica difusa para la optimización de tanques de sobrepresión en proyectos de ingeniería.</p> <p>La lógica difusa se utiliza para manejar la incertidumbre y la imprecisión en los datos y restricciones del problema de optimización.</p> <p>Los algoritmos genéticos, se emplean para explorar y encontrar soluciones óptimas dentro del espacio de diseño definido.</p> <p>Este enfoque combina la capacidad de los algoritmos genéticos para buscar soluciones globales con la flexibilidad de la lógica difusa para manejar la vaguedad en los criterios de diseño y restricciones.</p>	<p>Esta técnica puede ayudar a mejorar la eficiencia y la funcionalidad de los tanques de sobrepresión en sistemas hidráulicos y, en última instancia, contribuir a una gestión más efectiva de recursos hídricos y sistemas de abastecimiento de agua.</p> <p>Ofrece una forma efectiva de abordar problemas de optimización en sistemas hidráulicos y de gestión de agua, teniendo en cuenta la incertidumbre y la vaguedad en los datos y restricciones del problema.</p>
Aplicación del algoritmo genético multiobjetivo strength pareto evolutionary algorithm (SPEA) y su efectividad en el diseño de redes de agua potable. Caso: Sector Viñanitacna (Tesis pregrado) [4].	<p>El objetivo principal es encontrar soluciones que equilibren múltiples objetivos, como la minimización de costos de construcción, la maximización de la eficiencia del suministro de agua y la minimización de pérdidas de agua.</p>	<p>Los resultados obtenidos muestran cómo SPEA puede generar soluciones que representan compromisos efectivos entre los objetivos múltiples.</p> <p>Se discuten las ventajas y limitaciones del enfoque, así como las implicaciones para el diseño de redes de agua potable en áreas similares.</p>

ARTÍCULO	ASPECTOS IMPORTANTES	RESULTADOS OBTENIDOS
Transient stability of a hydroturbine governing system with different tailrace tunnels. Journal of hydraulic research. [7].	<p>Este estudio se enfoca en analizar la estabilidad transitoria de un sistema de regulación de turbinas hidráulicas y cómo esta estabilidad se ve afectada por las características de los túneles de desagüe asociados.</p> <p>Se examina cómo diferentes diseños y geometrías de túneles de desagüe pueden impactar la respuesta transitoria del sistema de regulación de las turbinas. Esto se hace mediante análisis de simulación y modelado computacional que tienen en cuenta una variedad de condiciones operativas y escenarios transitorios.</p>	<p>Arrojan luz sobre cómo seleccionar y configurar adecuadamente los túneles de desagüe para optimizar la estabilidad y el rendimiento de las turbinas en situaciones transitorias, como cambios en la carga o perturbaciones en el sistema eléctrico.</p> <p>Los hallazgos del estudio tienen implicaciones importantes para la operación eficiente y segura de plantas hidroeléctricas.</p>

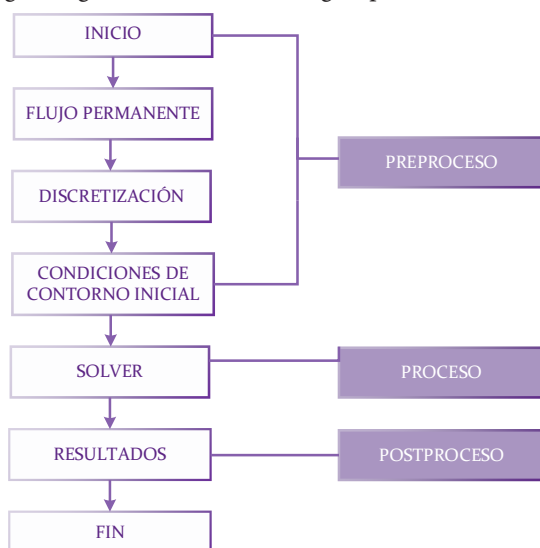
2. METODOLOGÍA

2.1. FLUJOGRAMA GENERAL DE LA METODOLOGÍA APLICADA

Para desarrollar la Ecuación 1 y Ecuación 2 para analizar el método de las características y el algoritmo genético a tratarse en este proyecto, proponiendo realizar una optimización de la chimenea de equilibrio, generando un modelo matemático del flujo transitorio en un sistema propuesto, primero se necesita definir claramente el sistema y las variables involucradas. En la Figura 1 se proporciona una descripción general de cómo se podría abordar el problema de flujo transitorio considerando preproceso, proceso y postproceso.

Figura 1.

Flujograma general de la metodología aplicada.



2.1.1. Preproceso

El preproceso se refiere a las tareas o acciones que se realizan antes de ejecutar un proceso principal, es decir, preparar los datos, configuraciones, entornos u otros

elementos necesarios para que el proceso principal sea efectivo y eficiente.

Para este proyecto se ha generado varios scripts como son:

- MET_CAR: Aplicación que desarrolla el método de las características.
- COURANT: calcular la celeridad para cada una de las tuberías ingresadas.
- ALG_GEN: Genera resultados en base a algoritmos genéticos.
- RESULTADOS: Genera gráficas y tablas de los resultados del ALG_GEN.

Las condiciones iniciales consisten en la información sobre datos geométricos e hidráulicos de la conducción y de la chimenea de equilibrio, para ingreso inicial son necesarios los siguientes datos:

Para conductos:

- Longitud de tramo
- Diámetro de tramo
- Coeficiente de rugosidad
- Caudal

Para chimenea de equilibrio:

- Variación Volumétrica
- Diámetro de la chimenea de equilibrio
- Diámetro del ramal de unión
- Coeficientes de pérdidas a la entrada y/o salida de la chimenea

Una vez ingresados todos los datos geométricos, iniciará la simulación y dentro del código empezará la resolución de las condiciones de contorno como las condiciones iniciales del sistema.

Las condiciones de contorno especifican los cálculos a algunas condiciones particulares en los límites o contornos del sistema.

- Condiciones aguas arriba
- Condiciones aguas abajo
- Condiciones puntos intermedios
- Condiciones de la chimenea de equilibrio

El método de las características necesita determinar el paso del tiempo y espacio, garantizando la convergencia del modelo, para poder lograrlo se utiliza la condición de Courant - Friedrichs - Lewy [1].

Una vez analizadas cada una de las tuberías por separado se considera el criterio de Courant - Friedrichs - Lewy y se define un Δx , Δt , número de tramos, el error permitido será menor al 10% que es una de las condiciones para que sea convergente el modelo.

La carga piezométrica se la determina obteniendo los datos del nivel del embalse ya que este será igual al punto extremo de aguas arriba que es el nivel estático de presión en un reservorio.

2.1.2. Proceso

En esta etapa se ejecutan las operaciones específicas. El propósito del proceso es realizar el trabajo principal para el cual se preparó los datos o el entorno durante el preproceso, a continuación, se detalla el procedimiento realizado.

En un flujo transitorio existe una variación de los parámetros hidrodinámicos a través del tiempo generando diferencias en la carga piezométrica en sobrepresiones y depresiones. Para determinar las ecuaciones hidráulicas en un sistema de Embalse - Túnel - Chimenea de Equilibrio Superior - Tubería de presión - Turbina, se debe resolver las ecuaciones diferenciales de masa y fuerza utilizando el método de las características, esta técnica de métodos numéricos es en base al estudio de los transitorios, buscando un modelo que no simplifique las ecuaciones y considere todas las variables, como es el modelo elástico.

Una vez seleccionado el método de las características como modelo de resolución para el sistema propuesto, en la Figura 2 se desarrolló un flujograma que consiste en representación de una serie de procesos en donde se indica el procedimiento de resolución del método de las características.

Para la programación de los algoritmos genéticos se requiere una representación adecuada y una función objetivo que ajuste al problema, que asigne un número real a cada posible solución de codificación. Donde primero se debe seleccionar un padre para la reproducción y luego se realizará el cruce para generar dos hijos, con un operador de mutación diferente.

El resultado de la combinación será un conjunto de individuos (posibles soluciones al problema) que serán parte de la siguiente población. Un individuo debe representarse como un conjunto de parámetros (genes) que cuando se combinan forman una cadena de valores (cromosomas).

La función objetivo juega un papel importante en la clasificación potencial de las soluciones según sus características, es el criterio para optimizar y evaluar las cualidades individuales. Las funciones objetivo que se van a utilizar en este proyecto son:

- Diámetro del Ramal de unión (DOR)
- Diámetro de Chimenea de Equilibrio (DCH)

Una vez definidas las funciones objetivo, estas van a ser los valores que el algoritmo genético va a buscar entre las restricciones dadas por el usuario, de estos diámetros se eliminarán todas las opciones que sobrepasen las condiciones del sistema que se incluirán al modelo como datos iniciales.

Una vez definidos los diámetros el programa desarrollará el método de las características en donde entrega los resultados de carga piezométrica que ocurre en la chimenea de equilibrio, y se compara con los valores del nivel máximo que puede tener la chimenea.

Una vez elegida la solución que cumpla con todas las condiciones del proyecto, el programa realiza un listado de las soluciones más sobresalientes obtenidas de los datos iniciales de población e iteraciones ingresadas por el usuario, cada uno de estos resultados tendrá adicionalmente un valor proporcional de lo que costaría realizar este tipo de chimenea de equilibrio en unidad monetaria, además va a servir como referente para realizar un análisis no solo con carga piezométrica, sino un costo para ejecutar el proyecto, su importancia radica en que se cuenta con dos parámetros para dar una solución óptima y precisa para resolver este problema.

Se necesita definir el costo de la chimenea de equilibrio por lo que se realizó un análisis para definir los rubros más representativos en la construcción y los que tienen un valor en unidad monetaria que elevan los costos en una chimenea de equilibrio.

2.1.3. Postproceso

En el postproceso se analizará los resultados del proceso principal, realizando tareas de limpieza posteriores a tomar medidas basadas en los resultados.

Para realizar el análisis de las soluciones del algoritmo genético se creó un script llamado GRÁFICAS. Una vez realizado el algoritmo genético el programa solicita al usuario cargar los resultados obtenidos en el optimizador, donde la primera tabla que se muestra tiene el diámetro de la chimenea de equilibrio y su diámetro de ramal de unión con el valor de la carga piezométrica.

Se puede definir que los algoritmos genéticos usados como alternativa para solucionar problemas de dimensionamiento de la chimenea de equilibrio y del ramal de unión, son una herramienta muy eficaz debido a que son capaces de presentar diversas opciones en lo que respecta a la solución de problemas que afectan a la comunidad.

Para comprobar los resultados y determinar las relaciones que pueden existir se realizaron cinco gráficas que relacionan los siguientes parámetros:

- El diámetro del orificio restringido
- El costo de la chimenea
- Pérdidas de carga
- Diferencia de diámetros
- Diámetro del orificio restringido mínimo
- Costo de la chimenea mínimo
- Diámetro del orificio restringido mínimo
- Costo de la chimenea mínimo

Con los mejores resultados obtenidos por el algoritmo se realizó una gráfica de dispersión y al aplicar la línea de tendencia polinómica genera una relación inversamente proporcional entre estos resultados obtenidos.

La relación inversamente proporcional entre dos variables en este caso el diámetro del ramal de unión y el costo de construcción de la chimenea de equilibrio significa que cuando una variable aumenta, la otra disminuye, y viceversa, en proporciones tales que su producto se mantiene constante.

2.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN UN APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO

Para demostrar la aplicabilidad del programa se buscaron datos en la página de Celec y se efectuó la revisión del estudio de Factibilidad Avanzada, efectuada por ASTEC, luego se realizaron actualizaciones de los estudios tendientes a mejorar las características del proyecto hidroeléctri-

co, para definir los valores iniciales de diez centrales hidroeléctricas que se van a analizar en este proyecto.

Las centrales hidroeléctricas seleccionadas presentan una diversidad de características hidráulicas que las hacen especialmente interesantes para este estudio. Su análisis permitirá comprender mejor el comportamiento de diferentes turbinas y sistemas de generación. Además, la variedad en sus características geográficas y de diseño ofrecerá información valiosa sobre la eficiencia y optimización que se está realizando en el estudio.

A continuación, se presenta en la Tabla 2 el resumen de los principales datos de las centrales como el nivel máximo del embalse (NE), la cota superior del pozo de la chimenea de equilibrio (HCH/E), la cota del eje de la turbina (NT), el tipo de turbina y el caudal de diseño (Q) de las centrales hidroeléctricas analizadas en este proyecto.

Figura 2.

Esquema Obra de toma - *túnel de baja presión* - chimenea de equilibrio - tubería de presión y casa de máquinas

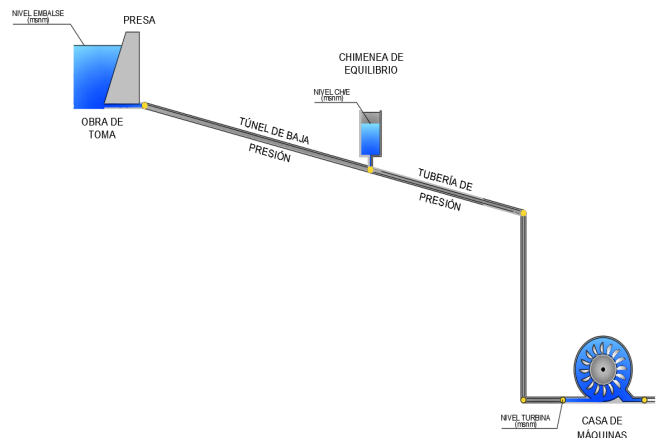


Tabla 2.

Datos de las centrales hidroeléctricas.

HIDROELÉCTRICA	NE (msnm)	HCH/E (msnm)	NT (man)	TIPO TURBINA	Q (m ³ /s)
1 CHONTAL	780.00	795.00	643.20	FRANCIS	180
2 MINAS SAN FRANCISCO	795.00	811.00	281.32	PELTON	65
3 LA UNIÓN	273.96	302.00	85.80	FRANCIS	65
4 OCAÑA II	451.90	480.69	275.00	PELTON	20
5 TOACHI PILATÓN	970.00	1013.00	732.00	FRANCIS	100
6 QUIJOS	2041.85	2060.00	1803.08	FRANCIS	22
7 LLANGANATES	2507.40	2499.93	2331.60	FRANCIS	13
8 APAQUI	2300.00	2315.00	1704.85	FRANCIS	9
9 SOPLADORA	1316.87	1333.00	978.00	FRANCIS	150
10 PALMA REAL	1148.00	1145.00	896.00	FRANCIS	80

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. COMPARACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL DISEÑO ORIGINAL Y EL DISEÑO OPTIMIZADO

Se realizó el proceso de optimización consiguiendo un tiempo de 15 min, con un promedio 1.5 min por iteración, este tiempo depende del tamaño de la población inicial y el número de iteraciones ingresadas, además de las características y capacidad tecnológica del computador utilizado para realizar la corrida.

Dentro de los resultados que se van a mostrar se encuentran los datos de diseño inicial que se abreviarán como DI, solución 1 como S1, solución 2 con S2 y solución 3 con S3 para cada una de las centrales hidroeléctricas, la diferencia entre sí es la modificación del diámetro del orificio restringido que va a ser considerablemente más pequeño con respecto al diámetro de la chimenea de equilibrio.

Una vez que finaliza este proceso de optimización, el programa ALG_GEN genera un archivo llamado result.xlsx en donde se encuentran los siguientes datos:

- Diámetro de chimenea de equilibrio (DCH)
- Diámetro del orificio restringido o ramal de unión (DOR)
- Carga piezométrica
- Costos

Una vez filtrados los resultados con los que se va a trabajar se seleccionan tres soluciones basándose en los siguientes parámetros:

- Solución 1 (S1): máximos costos de construcción de chimenea de equilibrio, máxima oscilación. (Mayores costos, mayor oscilación en chimenea de equilibrio).
- Solución 2 (S2): costos de construcción de chimenea de equilibrio intermedios, se escogerá oscilaciones promedio. (Iguales costos igual oscilación en chimenea de equilibrio).
- Solución 3 (S3): mínimos costos de construcción de chimenea de equilibrio y mínima oscilación. (Menor costo, menor oscilación en chimenea de equilibrio).

En la Figura 3 y Figura 4 se puede observar los valores de los diámetros de chimenea de equilibrio (DCH) vs. las centrales hidroeléctricas y los valores de los diámetros de orificio restringido (DOR) vs. las centrales hidroeléctricas, respectivamente, en los cuales se representa las medias de las tres mejores soluciones seleccionadas por el programa, donde se ve claramente la diferencia entre los diámetros con respecto al original.

Figura 3.

Relación de diámetros de chimenea de equilibrio (DCH) vs. las centrales hidroeléctricas

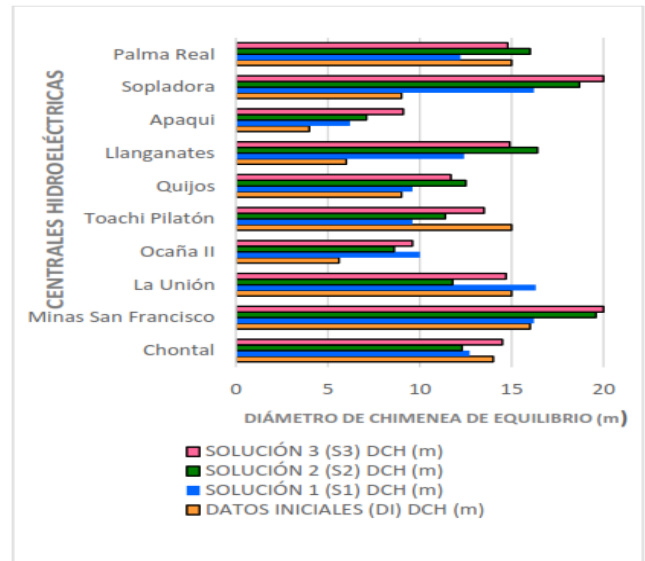
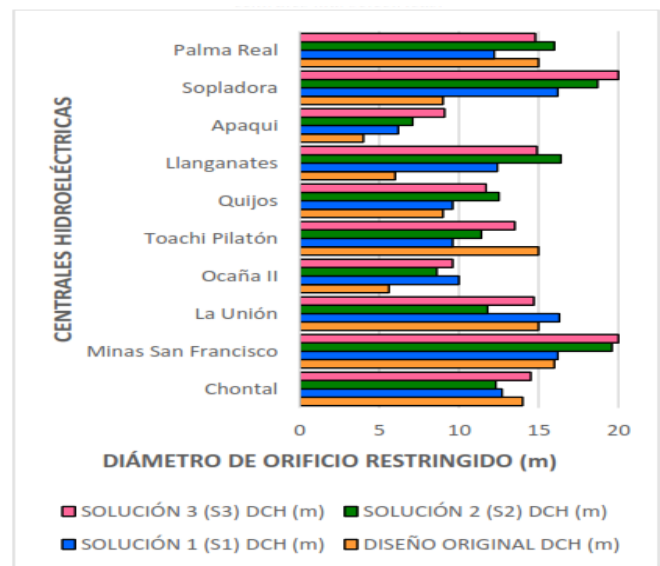


Figura 4.

Relación de diámetros de chimenea de equilibrio (DOR) vs. las centrales hidroeléctricas.



3.2. VERIFICACIÓN DE LAS ENVOLVENTES EXTREMAS DE CARGA PIEZOMÉTRICA

Para la resolución de transitorios en el sistema embalse - túnel - chimenea de equilibrio superior - tubería de presión - turbina, se requiere de programas de cálculo numérico que permitan la solución simultánea de las ecuaciones de continuidad y dinámica para un flujo variado y no permanente. Se utiliza el método de las características que permite determinar las cargas y caudal a lo largo de la tubería en cualquier instante de tiempo.

Es más importante establecer los valores máximos y mínimos de la carga que se presentará en cada punto de la conducción, independientemente del tiempo en el que se haya presentado, para cada una de las centrales hidroeléctricas que se va a analizar. Las envolventes de cargas extremas están conformadas por envolventes de cargas máximas y envolventes de cargas mínimas que dará el programa.

Una vez ingresados los datos de DOR y DCH de cada central hidroeléctrica se generan resultados para desarrollar gráficas de envolventes extremas de carga piezométrica, donde con sus valores de envolventes máximas y mínimas, se podrá definir los transitorios que existen alrededor de la conducción.

Cada una de las centrales hidroeléctricas tendrá cuatro gráficas para envolventes máximas - mínimas y los valores iniciales, identificando que la relación con respecto a las envolventes es muy similar, difieren muy poco con relación a la carga piezométrica, esto indica que las soluciones escogidas con el programa ayudan al momento de tomar una decisión con respecto a seleccionar la mejor solución.

Al analizar las envolventes de cargas mínimas se puede indicar que si uno de los valores obtenidos pasa por debajo del perfil de la tubería se obtendrá presiones negativas encontrándose depresión en la conducción, para el caso de las hidroeléctricas analizadas se puede observar que ninguna solución da presiones negativas, por lo no existen problema de depresión ni sobrepresión en la conducción.

Un resultado de los gráficos obtenidos presentados de las envolventes de cargas extremas va a indicar el análisis de los transitorios hidráulicos en las tuberías a presión; además, se puede observar que por sus diámetros de chimenea de equilibrio, relativamente similares, se tiene variaciones mínimas de la carga piezométrica, debido a la disminución del diámetro, la carga piezométrica máxima tiene un decremento en comparación con los otros resultados y la carga piezométrica mínima tiene un incremento.

3.3. OSCILACIONES DE MASA EN CHIMENEA DE EQUILIBRIO SUPERIOR

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante el método de las características de la variación de la altura piezométrica de las tuberías en el tiempo y el efecto que ocasiona el cambio de diámetro en la chimenea de equilibrio o en el orificio restringido al aumento de las pérdidas de carga.

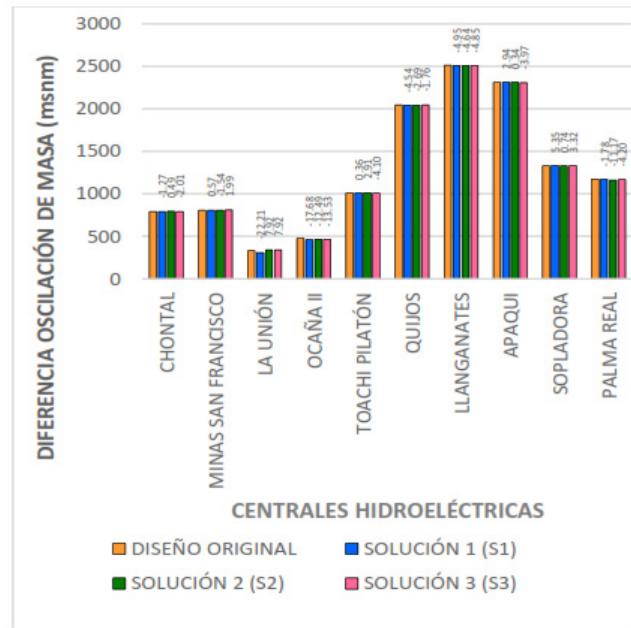
Para cada una de las centrales hidroeléctricas, la diferencia entre sí es la modificación del diámetro del orificio restringido que va a ser considerablemente más pequeño con respecto al diámetro de la chimenea de equilibrio, lo que va a generar un aumento de las pérdidas de carga, ocasionando una mejor estabilidad y amortiguación de las oscilaciones de masa.

Como resultado, se obtiene que las oscilaciones de masa ocurridas en la chimenea de equilibrio, varían considerablemente dependiendo del área y del tipo de cierre de válvula, a mayor área las oscilaciones presentes son menores.

Se puede apreciar que, dependiendo de cada una de las soluciones, las oscilaciones varían de manera considerable al cambiar el área de la chimenea instalada para un mismo tipo de cierre. Teniendo en cuenta que para mayor área el movimiento presenta una amplitud menor y también un periodo mayor.

Figura 5.

Diferencia de oscilación de masa vs. centrales hidroeléctricas.



3.4. RELACIÓN ENTRE LA MÁXIMA SOBREPRESIÓN DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO Y LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN EL RAMAL DE UNIÓN

Al tener una chimenea de equilibrio con un orificio restringido esta produce pérdidas de carga que son mayores cuando el agua entra en el tanque que cuando sale, es por esta razón que es necesario determinar las pérdidas que existen en comparación con una chimenea de equilibrio simple.

La carga piezométrica máxima que existe en una chimenea de equilibrio con y sin orificio restringido, determina las pérdidas de carga que existen, tanto en el diseño inicial como en cada una de las soluciones, concurriendo una mayor pérdida de carga al existir ramal de unión, reduciendo de esta forma los resultados de oscilación de las chimeneas simples.

Esta diferencia que existe entre las dos cargas piezométricas es el valor de pérdida de carga que se tiene al utilizar el ramal de unión en una chimenea de equilibrio, es por esta razón que se puede disminuir diámetros si se hace una correcta elección en las dimensiones, sabiendo que mientras más grande sea el ramal de unión, menores serán las pérdidas, con los resultados se observa que un

diámetro de orificio restringido pequeño genera valores más altos de pérdidas de carga.

Con estos resultados evidentemente, una chimenea simple tendrá un costo de construcción alto, debido a que es necesario realizar gastos en excavación y recubrimiento de la sección transversal que ocupará esta chimenea para evitar el desgaste de material cuando exista contacto con el agua, tomando en cuenta que la altura debe ser mayor, para suplir con las necesidades que tiene el sistema de equilibrar las sobrepresiones producidas por el golpe de ariete. Razón por la cual, la mejor solución con respecto a reducir las sobrepresiones va a ser el ramal de unión, el cual permitirá que exista una pérdida de carga que atenúe las oscilaciones del nivel de agua que ocurren al existir operaciones bruscas, siendo estas de apertura o cierre. La chimenea de equilibrio cumple con la función de permitir un movimiento oscilatorio con el embalse, como efecto del golpe de ariete que pueda darse en el sistema a causa de una maniobra brusca en la operación de las válvulas de guardia.

3.5. ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN DEL SISTEMA ORIGINAL Y EL SISTEMA OPTIMIZADO.

Como resultado de los algoritmos genéticos se encuentran los mejores resultados con base en el costo de la chimenea de equilibrio vs. la oscilación, en la cual se determina que no por ser el costo más alto la oscilación es menor, esto dependerá del área del orificio restringido que se tenga para esta chimenea.

Se puede definir que los algoritmos genéticos usados como alternativa para solucionar problemas de dimensionamiento de la chimenea de equilibrio y del ramal de unión, son una herramienta muy eficaz debido a que son capaces de presentar diversas opciones en lo que respecta a la solución de problemas que afectan a la comunidad.

En la Figura 7 se representa los resultados de la diferencia de los costos de construcción de cada solución de las chimeneas de equilibrio con respecto al valor original, en las cuales la variación de los resultados indica cuál de las soluciones se puede escoger para utilizar en el diseño, debido a que el valor del costo de construcción está relacionado con la oscilación, el menor costo también representa una disminución de la oscilación.

4. CONCLUSIONES

4.1. CONCLUSIONES DE LA GEOMETRÍA DEL DISEÑO ORIGINAL Y EL DISEÑO OPTIMIZADO

- Con el valor promedio de los diámetros de la chimenea de equilibrio de las tres soluciones en comparación

con el diámetro inicial para cada una de las centrales hidroeléctricas se puede determinar que:

- Chontal tiene una disminución del 6%
- Minas San Francisco un incremento del 16%
- La Unión una disminución del 5%
- Ocaña II un incremento del 68%
- Toachi Pilatón una disminución del 23%
- Quijos un incremento de 25%
- Llanganates un incremento de 25%
- Apaquí un incremento de 143%
- Sopladora un incremento de 87%
- Palma Real una disminución de 4%

Teniendo un valor promedio para todos los diámetros de chimenea de equilibrio el 40% incrementó, estableciendo que para el caso de las chimeneas de equilibrio el aumento de la sección es la solución más recomendable.

- Para el caso de los diámetros de orificio restringido, relacionando un promedio de las tres soluciones y comparando con el diámetro inicial se puede determinar que para cada una de las centrales se tiene los siguientes valores:

- Chontal se tiene una disminución del 11%
- Minas San Francisco una disminución del 28%
- La Unión una disminución del 38%
- Ocaña II una disminución del 26%
- Toachi Pilatón una disminución del 19%
- Quijos una disminución de 12%
- Llanganates una disminución 35%
- Apaquí un incremento de 161%
- Sopladora una disminución de 7%
- Palma Real una disminución de 28%

Se tiene un valor promedio para todos los diámetros de orificio restringido del 4% de disminución, estableciendo que para el caso del orificio restringido las soluciones más óptimas están relacionadas con la disminución del diámetro.

4.2. CONCLUSIONES DE LAS ENVOLVENTES EXTREMAS DE CARGA PIEZOMÉTRICA.

- Haciendo una comparación entre los datos generados para el diseño y las tres soluciones, se puede observar que estos datos varían en el 4%, ya sea de incremento o disminución de la oscilación, siendo la más crítica la oscilación de la central hidroeléctrica La Unión.
- Las centrales hidroeléctricas con una disminución de la oscilación y con un porcentaje menor al 1% son las centrales hidroeléctricas Ocaña II, Apaquí y Palma Real, siendo este el 30% del total del análisis.

- Para el total de centrales hidroeléctricas analizadas se tiene un incremento del nivel máximo de la oscilación en la chimenea de equilibrio del 0.19% siendo este un valor mínimo, determinando de esta forma la eficiencia de la selección de los diámetros a analizarse.

4.3. CONCLUSIONES DE LAS OSCILACIONES DE MASA EN CHIMENEA DE EQUILIBRIO SUPERIOR

- Los resultados del nivel máximo de oscilación en la chimenea de equilibrio comparando las soluciones y el dato inicial indica que existe una disminución del nivel en un 0.45% de la carga piezométrica del 80% del total de las centrales hidroeléctricas.
- Al realizar el análisis del tiempo del nivel máximo de oscilación se puede determinar que existe un incremento en un 22.69%, teniendo un valor más elevado en la central hidroeléctrica Ocaña II con un 98% mayor al original, esto en vista de que los diámetros de la chimenea de equilibrio de las soluciones son más grandes y el diámetro del orificio restringido disminuye.
- Con los datos de oscilación de masa de la central hidroeléctrica Llanganates se puede determinar que los diámetros de las tres soluciones son muy grandes en comparación con el diámetro inicial, generando unas oscilaciones más prolongadas en el tiempo y con un menor valor que la original, teniendo valores de diámetro de la chimenea de equilibrio mayores al 143% superior del diámetro original.

4.4. CONCLUSIONES DE LA RELACIÓN ENTRE LA MÁXIMA SOBREPRESIÓN DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO Y LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN EL RAMAL DE UNIÓN

- Con los datos de pérdidas de carga se puede determinar que para la central hidroeléctrica Toachi Pilatón, con la solución 1 se incrementa de una manera muy drástica el nivel máximo de oscilación en la chimenea, es por esta razón que sus pérdidas de carga son excesivas en comparación con las otras dos soluciones y del valor inicial, teniendo un incremento excesivo.
- Con estos resultados, evidentemente el incremento del nivel de oscilación, al no existir un orificio restringido, ocasiona que existan datos muy altos, que generan pérdidas de carga elevadas, como son el caso de las centrales hidroeléctricas de Ocaña II, Toachi Pilatón, Sopladora y Palma Real, generando un incremento de más del 100% en comparación con el diseño original.

4.5. CONCLUSIONES DE LA ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN DEL SISTEMA ORIGINAL Y EL SISTEMA OPTIMIZADO

- Para la central hidroeléctrica Chontal se obtiene que los valores iniciales de la chimenea original necesitan de \$ 1.19 UM para tener una oscilación de 792.49 msnm; en la solución 1 requiere de \$ 1.01 UM para una oscilación 791.22 msnm; la solución 2 con \$ 1.47 UM para una oscilación 792.40 msnm. Finalmente, en la tercera solución es necesario de \$ 1.89 UM para una oscilación 792.44 msnm; esto demuestra que la solución más óptima es la solución 1 ya que disminuye un 15% el costo total de fabricación de la chimenea, además se disminuye un 0.16% la oscilación, esto quiere decir que la altura de la chimenea será menor a la propuesta en el sistema original.
- Las diez centrales hidroeléctricas analizadas permiten realizar una gráfica más real con respecto a su diámetro del orificio restringido vs. el costo de la chimenea de equilibrio, escogiendo un valor del diámetro del orificio restringido, ir a la línea de tendencia y generar un costo en unidades monetarias más representativo al tipo de hidroeléctrica que se está trabajando; para el caso de las gráficas de pérdidas de carga y la diferencia de los diámetros de orificio restringido y chimenea de equilibrio su línea de tendencia polinómica de segundo grado no representa una solución que se pueda representar en este estudio debido a que sus valores son muy dispersos.

4.6. CONCLUSIONES GENERALES

- La resolución de una chimenea de equilibrio con el método de características puede tomar mucho tiempo en su aplicación al intentar encontrar la mejor solución entre una población mayor, razón por la cual al utilizar algoritmos genéticos se pudo comprobar que disminuyó los tiempos de obtención de resultados y generar soluciones factibles que el usuario estaría dispuesto a elegir.
- Mediante este programa, se logró crear aplicaciones para que al utilizar algoritmos genéticos sirvan como instrumento para resolver los problemas que presenta una central hidroeléctrica, constituyéndose como una herramienta eficaz al momento de tomar decisiones, debido a que la técnica de optimización genera soluciones simultáneas a diferentes problemas como la determinación de diámetro de chimenea de equilibrio y diámetro de ramal de unión, asimismo cumple con un valor de costo, utilizando los múltiples criterios.
- La forma más certera para comprobar los resultados de la optimización es realizar un *benchmark*. Esta técnica consiste en medir el rendimiento de la aplicación, utilizando varias máquinas para determinar el tiempo de ejecución más eficiente, de la cual en procesador Intel

Core I7 se tuvo un tiempo de ejecución de 15 min, siendo un tiempo muy corto en comparación con el tiempo que toma realizar el mismo procedimiento de forma manual ingresando diferentes condiciones para probar al sistema.

- Con los resultados de las hidroeléctricas se llegó a la conclusión de que cada una de ellas tiene su propia relación, sin embargo, al agruparlos para representar una gráfica total no se puede generalizar los resultados, observando que no existe ninguna relación entre ellas.

REFERENCIAS

[1] Calderón Vásquez, D. N. & Enríquez Paredes, D. F. (2011). *Diseño y optimización de una hoja de cálculo para el dimensionamiento de chimeneas de equilibrio* (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito.

[2] Capdevila, J. F., Ruiz, J. M., Salinas, J. L., & Sánchez Pérez, E. (2010). Redes neuronales y algoritmos genéticos en la docencia en las escuelas de ingenieros: un problema práctico de diseño de pantallas acústicas. *Modelling in Science Education and Learning*, 3(2), 17-27.

[3] Silva Padilla, P. G. & Veliz Sánchez, E. D. (2012). *Análisis del flujo no permanente en chimeneas de equilibrio por medio de una simulación numérica* (Tesis pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito.

[4] Quevedo Porras, V. Z. (2017). *Aplicación del algoritmo genético multiobjetivo strength pareto evolutionary algorithm y su efectividad en el diseño de redes de agua potable. Caso: Sector Viñanitacna* (Tesis pregrado). Universidad Privada de Tacna, Tacna.

[5] Universidad Nacional de Ingeniería, D. (2015). Tránsito hidráulico, flujo en superficies libres.

[6] Marcos Fano, J. (2018). La generación de energía hidroeléctrica. España: UNESA.

[7] Chen, D., Li, C., Pang, W., Patelli, E., Tian, Y., Zhang, H., & Zhou, J. (2019). Transient stability of a hydro-turbine governing system with different tailrace tunnels. *Journal of Hydraulic Research*, 1-10.

[8] Sandoval Erazo, W. (2018). *Diseño de obras hidrotécnicas*. Universidad de las fuerzas Armadas ESPE.

[9] Tituaña Vázquez, G. & Torres Rivas, E. (2018). *Diseño de tubería de presión en centrales hidroeléctricas y análisis comparativo de tecnología de materiales acero y poliéster reforzado con fibra de vidrio*. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

[10] Guervós, M. (2004). Informática evolutiva: algoritmos genéticos.

[11] Chamani, M. R., Pourshahabi, S., & Sheikholesalm, F. (2013). Fuzzy genetic algorithm approach for optimization of surge tanks. *Scientia Iranica*, 20(2), 278-285.

[12] Molina Godoy, N. (2019). *Estudio de fenómenos transitorios en aducciones de centrales*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

[13] Fathi-Moghadam, M., Haghhighipour, S. y Vali Samani, H. M. (2013). Design-Variable Optimization of Hydropower Tunnels and Surge Tanks Using a Genetic Algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(2), 200-208.

[14] Molina Godoy, N. (2019). *Estudio de fenómenos transitorios en aducciones de centrales*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

ANEXOS

Figura 6.

Relación oscilación de masa vs soluciones y diseño original.

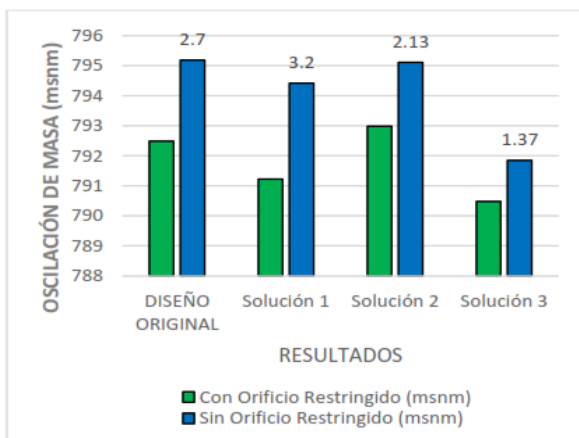


Figura 7.

Relación costo de construcción vs centrales hidroeléctricas.

