

DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA EL MODELADO Y SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DEL BAJO CARONÍ

Sergio Velásquez¹, Paola Durrego¹, Luis Viscaya²

¹Centro de Investigación de las Redes Neuronales y la Robótica CIRNAR-UNEXPO, Ciudad Guayana, Bolívar 8050 Venezuela.,

²CORPOELEC Ciudad Guayana, Bolívar 8050 Venezuela
E-mail:sergiovelasquezg@gmail.com

Recibido (30/01/17), aceptado (29/03/17)

Resumen: En el Despacho Regional Guayana, específicamente en la Unidad de Ingeniería de Operaciones, existe la necesidad de actualizar el software que se encarga de realizar la Simulación Energética de las Centrales Hidroeléctricas ubicadas en el bajo Caroní, denominado “Simulación Energética de Centrales en Cascada del Caroní, SEECA”, ya que en la actualidad está desarrollado bajo el lenguaje de programación Visual Basic 6.0 y sólo se incluye a las plantas Guri, Caruachi y Macagua. El nuevo software será diseñado bajo el paradigma de la programación orientada a objetos con Python 2.7.12 | Anaconda 4.2.0 utilizando para el diseño de la interfaz Tkinter. Esta interfaz tendrá la capacidad de realizar las simulaciones energéticas a corto y largo plazo considerando los caudales de aportes y nivel inicial del embalse de Guri, la demanda eléctrica y el periodo de simulación. Además, considerar la entrada en operación de Tocoma. En los resultados de la simulación se debe obtener los datos de las principales variables energéticas de operación y generación de las centrales para realizar la planificación y toma de decisiones en el Sistema Eléctrico Nacional.

Palabras Clave: Hidroeléctrica, embalse, caudales, turbinado, generación, nivel, volumen.

DEVELOPMENT OF AN APPLICATION FOR THE MODELING AND SIMULATION OF THE LOW CARONÍ HYDROELECTRIC PLANTS

Abstract: In the CORPOELEC Guayana Regional Office, there is a need to update the software that simulates the low Caroni Hydroelectric Plants, in order to include the Tocoma Plant, update the programming language to the free software philosophy and change it to the object-oriented programming paradigm. The new software will be designed in Python 2.7.12 with Anaconda 4.2.0 using for the desing of the Tkinter Interface. The software will have the ability to make medium and long-term simulations, considering the contributions, the initial level of the Guri reservoir, the electric demand and the simulation period. Besides, the entry into operation of the Tocoma generating units. In the results it was obtained: The Guri Reservoir future level, Energy deficit, turbocharged flows, turbinated and discharged by spillway flows, among other data needed to make planning and decision-making in the National Electrical System.

Key words: Hydroelectric, reservoir, Guri, flow rates, turbine, generation, level, volume.

I. INTRODUCCIÓN

Venezuela, es uno de los pocos países en el mundo que tiene un gran potencial de energía hidroeléctrica concentrando grandes centrales de generación, mejor conocidas como: Guri, Caruachi, Macagua, y Tocoma, ubicadas en el bajo Caroní y representando un 65%, aproximadamente, de la generación de energía nacional.

El Embalse Guri es el de mayor reservorio, almacenando para la cota máxima; 271,0 m.s.n.m. un volumen de 132964 Hm³, siendo éste factor una variable estratégica porque permite conocer la disponibilidad de energía eléctrica a futuro. Dada la incertidumbre que causan los caudales de aportes en este embalse; donde se fundamentan los cálculos para ejecutar las simulaciones energéticas a mediano y largo plazo de las centrales, es indispensable tener información de las principales variables energéticas para realizar la planificación y toma de decisiones en el Sistema Eléctrico Nacional, considerando que una gestión inadecuada compromete seriamente la disponibilidad de electricidad en el país.

Es por esto que el objetivo principal es diseñar un sistema que permita realizar la simulación energética de estas centrales para mantener un control y así poder planificar y tomar decisiones, con el fin de optimizar las operaciones y lograr un proceso eficiente.

Este diseño realizará simulaciones energéticas diarias de las centrales y los embalses Guri, Caruachi y Macagua, destacando que se encuentran configuradas en cascada, seccionadas en grupos de máquinas y que se deben realizar las operaciones con la finalidad de suplir la demanda eléctrica correspondiente a Caroní. Además, se implementará la entrada en operación de Tocoma aunque, actualmente, se encuentre en construcción. [2]

El presente paper, está estructurado de la siguiente manera: en la sección II se presentan los modelos matemáticos para el desarrollo de la investigación: modelado de las centrales, modelado de la distribución de la generación tanto en las centrales como en los grupos que las conforman. En la sección II se presenta, el diseño del software orientado a objetos y desarrollo de la interfaz SEECA. En la sección III se presentan los resultados y discusión del funcionamiento. En la sección IV se presentan las conclusiones y finalmente, en la sección V las Referencias Bibliográficas.

II. DESARROLLO

Para llevar a cabo la simulación energética de las centrales hidroeléctricas ubicadas en el bajo Caroní, es necesario iniciar con el proceso de mo-

delado. Primeramente se hará una descripción de los modelos matemáticos utilizados para simular las operaciones de las centrales.

1 Análisis de los modelos

1.1.1 Modelo de las centrales hidroeléctricas.

Las centrales hidroeléctricas ubicadas en el bajo Caroní, se encuentran divididas en grupos de máquinas con el objetivo de operar para suplir la demanda eléctrica. Para crear los grupos de las centrales se considera: identificación del grupo, asignación de unidades, eficiencia, potencia máxima y mínima del grupo, la potencia generada y la potencia disponible. [3]

Configuración de las centrales hidroeléctricas.

Las centrales hidroeléctricas presentan una configuración en cascada, su ubicación privilegiada y las condiciones hidrográficas permiten reutilizar el agua, es decir, el caudal turbinado en una central aguas arriba es turbinado nuevamente en las centrales que se encuentran aguas abajo. La figura 1, muestra la configuración de las centrales hidroeléctricas. [4]

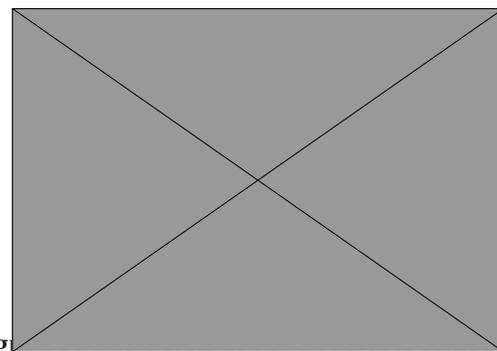


Fig. 1 Configuración de las centrales hidroeléctricas del Bajo Caroní

De acuerdo a la configuración de las centrales, se considera:

- El caudal de aportes de Tocoma depende del caudal turbinado de Guri.
- El caudal de aportes de Caruachi depende del caudal turbinado de Tocoma.
- El caudal de aportes de Macagua depende del caudal turbinado de Caruachi. [5]

Expresando matemáticamente esta relación:

$$Q_G = Q_T \quad (1)$$

$$Q_T = Q_C \quad (2)$$

$$Q_C = Q_{M1} + Q_{M2} + Q_{M3} \quad (3)$$

Donde:

Q_G : Caudal turbinado Guri.

Q_T : Caudal turbinado Tocoma.

Q_C : Caudal turbinado Caruachi.

Q_{M1} : Caudal turbinado Macagua I.

Q_{M2} : Caudal turbinado Macagua II.

Q_{M3} : Caudal turbinado Macagua III.

1.1.2 Modelo de la producción de energía y potencia

La generación de la energía hidroeléctrica se obtiene por medio de la transformación de la energía potencial del agua almacenada, a través del conjunto turbina-generator. Considerando el principio de conservación de energía y tomando en cuenta las pérdidas en dicha transformación. Matemáticamente se representa: [6]

$$E_e = E_p * n_t * n_g \quad (4)$$

Donde:

E_e : Energía producida en la central hidroeléctrica. (GWh)

E_p : Energía potencial de la masa de agua. (GWh)

n_t : Eficiencia de la turbina de la central hidroeléctrica.

n_g : Eficiencia del generador de la central hidroeléctrica.

La energía potencial de la masa de agua (E_p), es utilizada para accionar las turbinas en las centrales, siendo igual al producto del peso específico del agua de Río Caroní (9.743×10^{-3}), por la caída neta (m) y el volumen (Hm³), correspondiente a la masa de agua turbinada en la central durante el intervalo de tiempo considerado. Se puede expresar matemáticamente como:

$$E_p = K * H * V \quad (5)$$

Sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (4), se obtiene:

$$E_e = K * H * V * n_t * n_g \quad (6)$$

La potencia eléctrica es la cantidad de energía por unidad de tiempo, permitiendo expresar la potencia generada en una central en un intervalo de tiempo dado según la ecuación (4) como:

$$P_e = 9.81 \times 10^{-3} * H * Q_t * n_t * n_g \quad (7)$$

Donde: P_e es la potencia activa producida en la central en un intervalo de tiempo dado (MW) y

Q_t es el caudal turbinado.

El factor de producción (α), es interpretado como el caudal necesario para producir un megawatio (MW) en un instante de tiempo, permitiendo simplificar la ecuación (7), obteniendo:

$$\alpha = 9.81 \times 10^{-3} * H * n_t * n_g \quad (8)$$

Posteriormente, se obtiene la potencia activa producida en la central:

$$P_e = \alpha * Q_t \quad (9)$$

Finalmente, la representación de la producción de energía y potencia en una central se realiza en función del caudal turbinado ($Q_t(t)$), la caída neta (H) y la eficiencia de las turbinas hidráulicas. [6]

1.1.3 Modelo de la curva de capacidad

La curva de capacidad es la relación que existe entre el nivel y el volumen almacenado en el embalse Guri. En la figura 2, se muestra la curva de capacidad. [5]

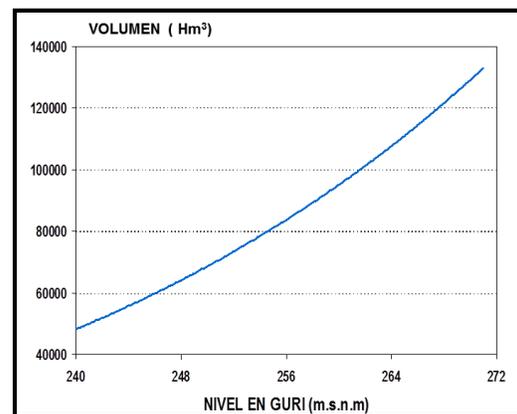


Figura 2: Curva de capacidad del Embalse Guri

1.1.4 Modelo del balance hídrico del Embalse Guri

Para modelar en el Embalse Guri el comportamiento de los volúmenes y los niveles se utiliza la ecuación del balance de agua, la cual permite obtener el volumen final del embalse, considerando el volumen inicial, volumen de entrada y volumen de salida. En la figura 3, se presenta un diagrama del cálculo del volumen final del embalse.

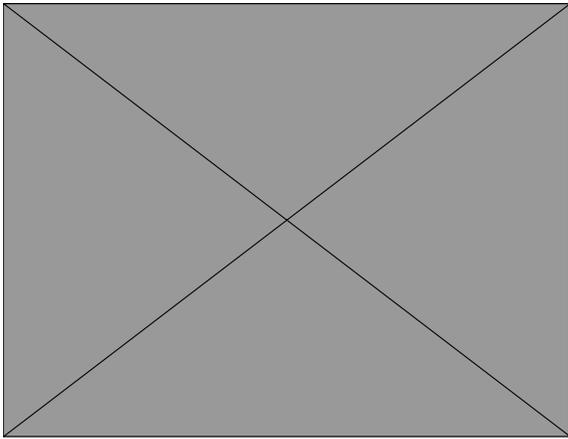


Figura 3: Representación de embalse para obtener el volumen final

La representación de este comportamiento se puede expresar matemáticamente, a través de las siguientes ecuaciones: [6]

$$V_f = V_i + V_a - V_s \tag{10}$$

$$V_s = V_t + V_v + V_e \tag{11}$$

Donde:

V_f: Volumen final.

V_i: Volumen inicial.

V_a: Volumen afluente.

V_s: Volumen de salida.

V_t: Volumen turbinado.

V_v: Volumen aliviado.

V_e: Volumen evaporado.

1.1.5 Modelo de la distribución de la generación

La distribución de la demanda de Caroní se realiza primero en las centrales y luego la demanda correspondiente a cada una es distribuida a los grupos que las conforman. [1]

1.1.5.1 Modelo de la distribución de la generación en las centrales.

La demanda eléctrica de Caroní debe ser distribuida entre las centrales Guri, Tocoma, Caruachi y Macagua. Expresando matemáticamente esta distribución:

$$D_C = P_G + P_T + P_C + P_M \tag{12}$$

Donde: **D_C** es la demanda en el Caroní, **P_G** es la potencia en Guri, **P_T** es la potencia en Tocoma y **P_C** es la potencia en Caruachi.

Cabe destacar que la distribución en Macagua se realiza en las tres casas de máquinas que la constituye. La potencia en Macagua es: [4]

$$P_M = P_{M1} + P_{M2} + P_{M3} \tag{13}$$

Donde: **P_M** es la potencia en Macagua, **P_{M1}**, **P_{M2}** y **P_{M3}** son las potencias en Macagua I, II y III

Se utiliza la relación entre el caudal turbinado de cada una de las centrales y la potencia eléctrica para reescribir las ecuaciones anteriores, siendo la potencia eléctrica generada igual a:

$$P = E_f * Q_t * C_N * K \tag{14}$$

Donde: **P** es la potencia eléctrica generada, **E_f** es la eficiencia, **Q_t** es el caudal turbinado, **C_N**

La caída neta y **K** representa el peso específico del agua, despejando el caudal turbinado (**Q_t**) de la ecuación (14), el cual hace referencia al caudal turbinado de cada una de las centrales y sustituyendo en las ecuaciones (1), (2) y (3), se obtiene:

$$\frac{P_G}{E_{fG} * C_{NG} * K} = \frac{P_T}{E_{fT} * C_{NT} * K} \tag{15}$$

$$\frac{P_T}{E_{fT} * C_{NT} * K} = \frac{P_C}{E_{fC} * C_{NC} * K} \tag{16}$$

$$\frac{P_C}{E_{fC} * C_{NC} * K} = \frac{P_{M1}}{E_{fM1} * C_{NM1} * K} + \frac{P_{M2}}{E_{fM2} * C_{NM2} * K} + \frac{P_{M3}}{E_{fM3} * C_{NM3} * K} \tag{17}$$

Donde:

P_G: Potencia Guri.

E_{fG}: Eficiencia Guri.

C_{NG}: Caída neta Guri.

P_T: Potencia Tocoma.

E_{fT}: Eficiencia Tocoma.

C_{NT}: Caída neta Tocoma.

P_C: Potencia Caruachi.

E_{fC}: Eficiencia Caruachi.

C_{NC}: Caída neta Caruachi.

P_{M1}: Potencia Macagua I.

E_{fM1}: Eficiencia Macagua I.

C_{NM1}: Caída neta Macagua I.

P_{M2}: Potencia Macagua II.

E_{fM2}: Eficiencia Macagua II.

C_{NM2}: Caída neta Macagua II.

P_{M3}: Potencia Macagua III.

E_{fM3}: Eficiencia Macagua III.

C_{NM3}: Caída neta Macagua III.

A través de las ecuaciones: (15), (16) y (17), se obtienen las potencias correspondientes a Tocoma, Caruachi y Macagua, respectivamente:

$$P_T = \frac{P_G * C_{NT} * E_{fT}}{(C_{NG} * E_{fG})} \tag{18}$$

$$P_C = \frac{P_T * C_{NC} * E_{fC}}{(C_{NT} * E_{fT})} \tag{19}$$

$$P_M = \frac{P_{M1}}{(C_{NM1} * E_{fM1})} + \frac{P_{M2}}{(C_{NM2} * E_{fM2})} + \frac{P_{M3}}{(C_{NM3} * E_{fM3})} \quad (20)$$

Donde la potencia en Macagua I y Macagua III se obtienen de las ecuaciones (21) y (22). Mientras que, la potencia en Macagua II se obtiene al despejarla de la ecuación (17) para luego ser sustituida en la ecuación (13). [8]

$$P_{M1} = U_{M1} * P_{m\acute{a}x1} \quad (21)$$

$$P_{M3} = U_{M3} * P_{m\acute{a}x3} \quad (22)$$

Donde: U_M1 y U_M3 son las unidades asignadas de Macagua I y III. P_máx1 y P_máx3 representan la potencia máxima de Macagua I y III. [1]

Finalmente, al sustituir las ecuaciones de las potencias de Tocoma, Caruachi y Macagua en la ecuación (12), se obtiene la potencia de Guri.

$$P_G = \frac{(C_{NG} * E_{fG})(D_C - a - b)}{(C_{NG} * E_{fG}) + (C_{NT} * E_{fT}) + (C_{NC} * E_{fC}) + (C_{NM2} * E_{fM2})} \quad (23)$$

$$a = \frac{P_{M1}(C_{NM1} * E_{fM1}) - (C_{NM2} * E_{fM2})}{(C_{NM1} * E_{fM1})} \quad (24)$$

$$b = \frac{P_{M3}(C_{NM3} * E_{fM3}) - (C_{NM2} * E_{fM2})}{(C_{NM3} * E_{fM3})} \quad (25)$$

Al considerar cuando entre en operación la primera unidad de Tocoma, se observó al resolver el sistema de ecuaciones anterior que la potencia eléctrica asignada sería mayor a la potencia eléctrica disponible en ésta, por tal razón se plantea:

Igualdad entre la potencia eléctrica a generar (P_T) y la potencia instalada (P_i), es decir: P_T = P_i.

Restar a la demanda Caroní (D_C) la potencia instalada (P_i), obteniendo la demanda total (D_T) que será distribuida entre Guri, Caruachi, Macagua I, II y III. Se puede expresar de la siguiente manera:

$$D_T = D_C - P_i \quad (26)$$

$$D_T = P_G + P_C + P_M \quad (27)$$

Igualando el caudal turbinado entre las centrales, ya que se encuentran configuradas en cascada:

$$Q_G = Q_C \quad (28)$$

$$Q_C = Q_{M1} + Q_{M2} + Q_{M3} \quad (29)$$

Despejando el caudal turbinado de la ecuación (14) y sustituyendo en las ecuaciones anteriores, se obtiene:

$$\frac{P_G}{E_{fG} * C_{NG} * K} = \frac{P_C}{E_{fC} * C_{NC} * K} \quad (30)$$

$$\frac{P_C}{E_{fC} * C_{NC} * K} = \frac{P_{M1}}{C_{NM1} * E_{fM1}} + \frac{P_{M2}}{C_{NM2} * E_{fM2}} + \frac{P_{M3}}{C_{NM3} * E_{fM3}} \quad (31)$$

Las ecuaciones (30) y (31), permiten obtener las potencias de Caruachi y Macagua, respectivamente:

$$P_C = \frac{P_G * C_{NC} * E_{fC}}{C_{NG} * E_{fG}} \quad (32)$$

$$P_M = \frac{P_{M1}}{(C_{NM1} * E_{fM1})} + \frac{P_{M2}}{(C_{NM2} * E_{fM2})} + \frac{P_{M3}}{(C_{NM3} * E_{fM3})} \quad (33)$$

Posteriormente, se sustituyen los datos obtenidos en la ecuación (12) y se obtiene la potencia de Guri.

$$P_G = \frac{(C_{NG} * E_{fG})(D_C - a - b)}{(C_{NG} * E_{fG}) + (C_{NC} * E_{fC}) + (C_{NM2} * E_{fM2})} \quad (34)$$

a y b se calculan a través de las ecuaciones (24) y (25).

Finalmente, se obtienen las potencias eléctricas generadas para cada una de las centrales, considerando los requerimientos de la potencia eléctrica cuando inicie en operación las unidades de la central Tocoma. [5] [6] Modelo de distribución de la generación entre los grupos de las centrales.

Una vez distribuida la demanda Caroní entre las centrales, se procede a distribuir la demanda entre los grupos. A continuación, se muestra la distribución de la generación en Guri, debido a que está constituida por diferentes grupos, mientras que en las demás centrales no es necesario; están conformadas por uno solo.

Distribución de la generación en Guri

La central Guri se encuentra dividida en dos grupos; Guri A y Guri B, que a su vez están conformados por sub-grupos. La distribución en Guri se realiza de la siguiente manera:

Para calcular la demanda, es necesario obtener la potencia de los grupos, la cual se obtiene al multiplicar la potencia máxima por las unidades asignadas.

Finalmente, se obtienen las potencias eléctricas generadas para cada una de las centrales, considerando los requerimientos de la potencia eléctrica cuando inicie en operación las unidades de la central Tocoma. [5] [6]

1.1.5.2 Modelo de distribución de la generación entre los grupos de las centrales.

Una vez distribuida la demanda Caroní entre las centrales, se procede a distribuir la demanda entre los grupos. A continuación, se muestra la distribución de la generación en Guri, debido a que está constituida por diferentes grupos, mientras que en las demás centrales

1.1.5.2.1 Distribución de la generación en Guri

La central Guri se encuentra dividida en dos grupos; Guri A y Guri B, que a su vez están conformados por sub-grupos. La distribución en Guri se realiza de la siguiente manera:

Para calcular la demanda, es necesario obtener la potencia de los grupos, la cual se obtiene al multiplicar la potencia máxima por las unidades asignadas.

$$P_{gr} = P_{m\acute{a}x} * U \tag{35}$$

Donde:

P_{gr}: Potencia de cada grupo.

P_{máx}: Potencia máxima de cada grupo.

U: Unidades asignadas de cada grupo (U_{M1} y U_{M3}).

Se calcula la generación (G_{ea}) para cada uno de los grupos que conforman el Grupo A, restando la demanda (D_d) menos la potencia del grupo (P_{gr}), una vez obtenido el resultado, éste valor pasa a ser la generación del siguiente grupo y así sucesivamente.

$$G_{ea} = (D_d - P_{gr}) \tag{36}$$

Mientras que, para obtener la demanda del Grupo B, se realiza otro procedimiento, la generación se distribuye porcentualmente. Calculando el Porcentaje para obtener la generación:

$$P_p = \frac{G * 100}{G_{sum}} \tag{37}$$

Donde:

P_p: Porcentaje de cada grupo.

G: Representa al grupo.

G_{sum}: Suma de todos los grupos que constituyen al Grupo B.

Finalmente, se obtiene la generación (G_{eb}) para cada uno de los grupos que conforman el Grupo B, considerando que la demanda (D_a) es el último resultado obtenido de Grupo A, es decir, el valor obtenido de Guri A 7-10 Reh.

$$G_{eb} = \frac{D_a * P_p}{100} \tag{38}$$

Esto permite obtener el turbinado de la central, el cual será la suma total de las generaciones, considerando el nivel aguas arriba. [8] [2] [1]

1.1.6 Modelo de la turbina

Para operar una turbina hidráulica es necesario considerar la relación de las siguientes variables: potencia generada, caída neta y rendimiento. Estas relaciones son complicadas, normalmente, se expresan en las cur-

vas de la eficiencia correspondientes a cada turbina hidráulica. A continuación, en la figura 4, se muestra la eficiencia en función de la potencia para las turbinas de las unidades de casa de máquinas II de Macagua.

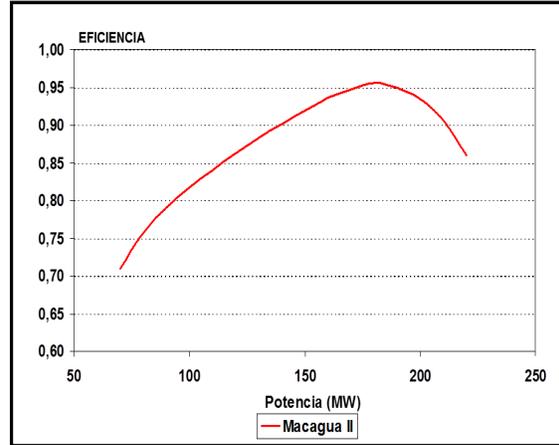


Figura 4: Curva de eficiencia en función de la potencia para las turbinas de las unidades de Macagua II

2 Herramienta SEECA

2.1.1 Organización

Esta organización se expone enfocada desde el punto de vista de su implantación informática a través de la programación en Python, utilizando, también, el módulo Tkinter, porque viene por defecto con la instalación para Microsoft Windows. Se ha utilizado el paradigma de la Programación Orientado a Objetos (POO), donde se propone modelar las centrales Guri, Tocoma, Caruachi, Macagua y el Embalse Guri en función de clases y objetos. De este modo, reducir tamaño y complejidad de código, facilitando la modificación e implementa-

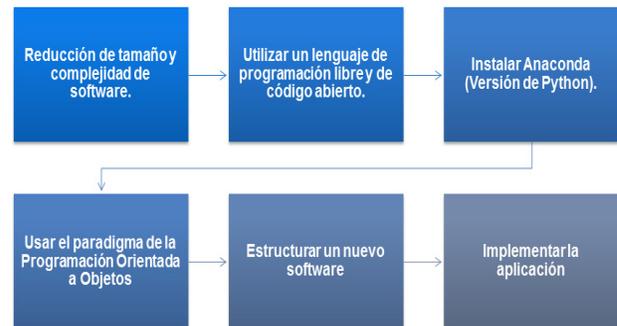


Figura 5: Procedimiento de la estructura

Los objetos realizados fueron denominados: serie, central, grupo, demanda, caso y simulador, desarrollando un procedimiento en cada uno con el fin de realizar la transmisión y recepción de la información necesaria para simular. [9]

2.1.2 Descripción del algoritmo

El algoritmo de la herramienta SEECA está seccionado en diferentes objetos dentro de los cuales están: central, grupo, serie, demanda y simulador. A continuación, se describen los módulos de la herramienta:

Objeto central: Este objeto está asociado a las centrales Guri, Tocoma, Caruachi, Macagua y a los objetos que las constituyen. Su algoritmo responde al esquema de la figura 6. [9] [10]

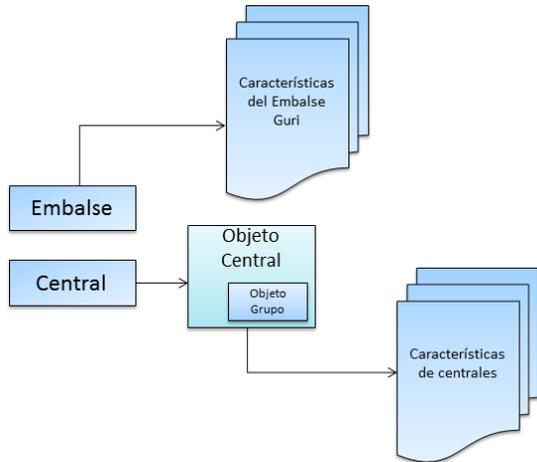


Figura 6: Diagrama del módulo central

La descripción es la siguiente:

Las simulaciones se basan, principalmente, en los niveles del Embalse Guri. A continuación, se plantea el procedimiento para obtener el nivel en el Embalse Guri:

- Dado el volumen final del Embalse Guri para un día, se realiza la conversión de volumen a nivel para conocer la cota inicial del siguiente día, a través de la curva de capacidad.

- El volumen final pasa a ser el volumen inicial.
- El volumen obtenido se convierte a caudal.

- Se inicia un ciclo hasta obtener el registro de los niveles para el periodo de simulación establecido. [7]

En la figura 7, se ilustra el proceso para obtener el nivel del Embalse Guri.

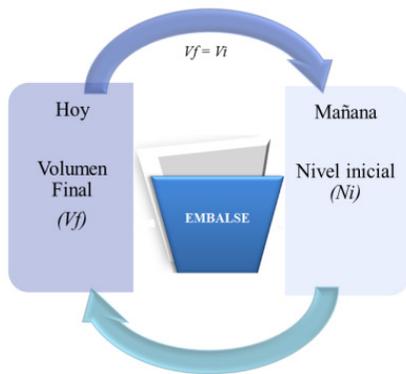


Figura 7: Proceso para obtener el nivel del Embalse Guri

En la figura 8, se muestran los diversos métodos empleados:

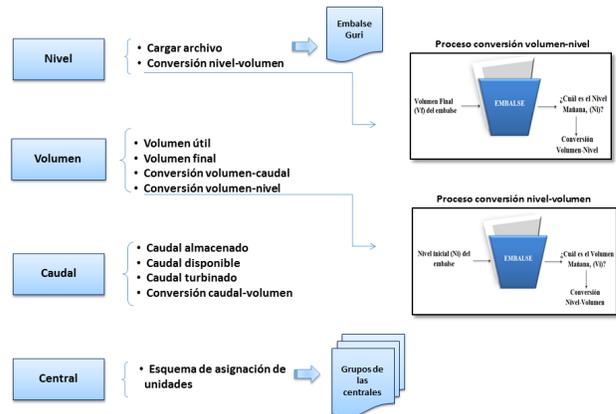


Figura 8: Diagrama de métodos del objeto central

Objeto grupo: Este objeto es una sección del objeto central que contiene las características de los grupos que las constituyen. En la figura 9, se muestran los diversos

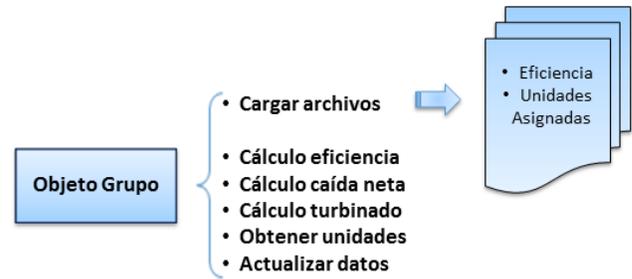


Figura 9: Diagrama de métodos del objeto grupo

La descripción es la siguiente:

- Cargan los archivos de eficiencia y unidades asignadas.

- Se calcula la caída neta, permitiendo el cálculo de la eficiencia.

- El caudal turbinado, se calcula para un grupo, dada su potencia y el nivel aguas arriba.

- El caudal turbinado es utilizado en el objeto central para calcular el caudal turbinado de todos los grupos.

- El método para obtener las unidades, consiste en adquirir las unidades asignadas del archivo asignación.

Objeto serie: Contiene la información de los caudales de aportes históricos del Embalse Guri. Los métodos desarrollados en este objeto se encargan de: cargar el archivo de los caudales de aportes históricos y obtener el rango de los caudales de aportes de acuerdo al periodo de simulación establecido por el usuario.

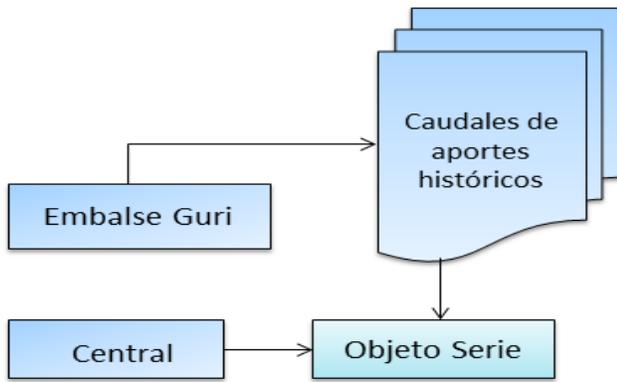


Figura 10: Diagrama del objeto serie

Objeto demanda: Contiene los métodos para: cargar desde un archivo la demanda eléctrica que corresponde a Caroní, obtener la demanda dado un periodo de simulación establecido y el método para actualizar los valores si son modificados por el usuario. Luego, los valores mensuales de la demanda son mostrados en la tabla de datos. El proceso para obtener la demanda se muestra en la figura 11.



Figura 11: Procedimiento para obtener la demanda eléctrica

Objeto caso: Contiene los datos necesarios para llevar a cabo la simulación. Es decir, se reúne la información necesaria para simular. El algoritmo de este objeto responde al esquema de la figura 12.

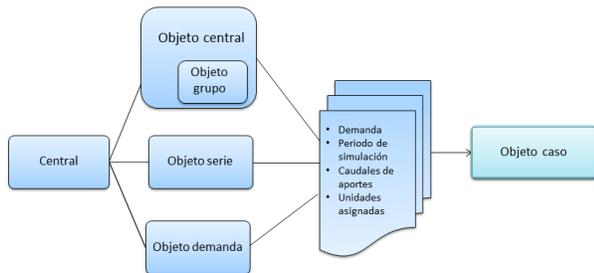


Figura 12: Diagrama del objeto caso

Objeto simulador: Este objeto es el encargado de recibir la información transmitida desde el objeto caso. En la figura 12, se muestran los diversos métodos empleados [10]:

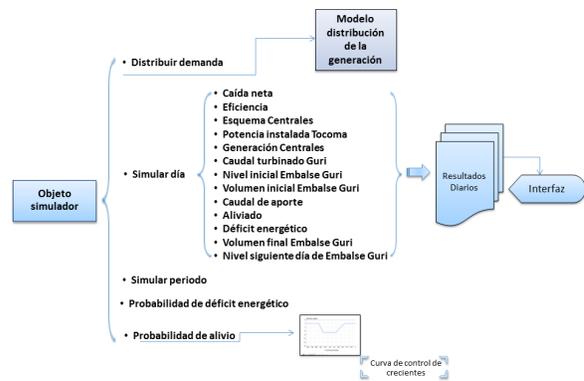


Figura 13: Diagrama de métodos del objeto simulador

La descripción es la siguiente:

- Para la distribución de la demanda se utiliza el modelo de la distribución de la generación.
 - El método simular día, se encarga de realizar la simulación diaria.
 - Una vez distribuida la demanda, se obtiene la generación de las centrales
 - Se calcula: caudal turbinado, aliviado, déficit energético, volumen inicial, nivel inicial, aportes, volumen final y nivel del embalse.
 - Los resultados obtenidos son almacenados para luego ser mostrados en una tabla de datos.
 - El método simular periodo, se encarga de realizar las simulaciones para un periodo establecido por el usuario, permitiendo obtener el nivel del Embalse Guri a futuro.
 - La probabilidad de descargas por aliviadero depende del nivel del embalse, caudal turbinado y aportes, ya que depende de si se alcanza la curva de control de crecientes.
 - La probabilidad de déficit energético, depende también de los factores mencionados anteriormente, ya que consiste en no poder suplir la demanda porque se alcanzó el nivel mínimo del embalse.
- En la figura 14, se muestra el proceso realizado para ejecutar una simulación



Figura 14: Proceso realizado para ejecutar una simulación

2.1.3 Desarrollo de la herramienta

El procedimiento es el siguiente:

- Se realizó la ventana de aplicación y las ventanas de diálogo que permitirán al usuario acceder a insertar y/o modificar información necesaria para llevar a cabo la simulación.

- La ventana de aplicación, se encargará de iniciar y finalizar la aplicación, además, permitir insertar los parámetros principales para simular. Es decir, es el menú principal de la herramienta SEECA.

- Las ventanas de diálogo, permitirán al usuario acceder a los parámetros secundarios para modificar y/o anexar información de acuerdo a las necesidades requeridas para simular. Es decir, son los sub-menús de la herramienta.

En la figura 15, se puede observar el menú principal de la herramienta.

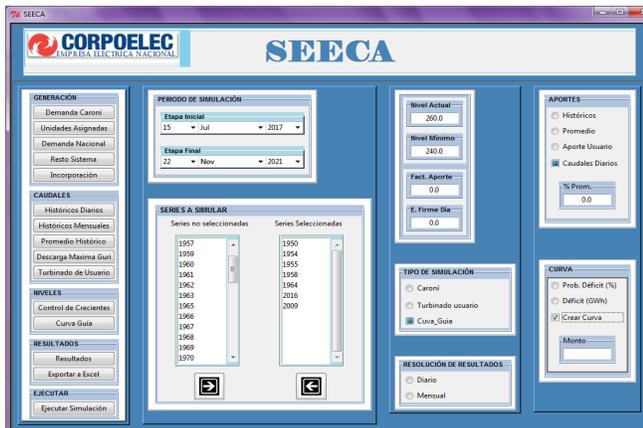


Figura 15: Herramienta SEECA

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3 Simulación del Embalse Guri

3.1.1 Simulación real del Embalse Guri

Se realiza una simulación con información real del nivel del Embalse Guri, para comparar los resultados obtenidos en el programa con la realidad. La figura 14, muestra las curvas de los registros del nivel del Embalse Guri para el periodo Ene-2018 / Dic-2018.

Las diferencias en los resultados pueden ser causadas por:

- Variación en la eficiencia de las turbinas.
- Sedimentación en el embalse.
- Error en la medición de los caudales de aportes.

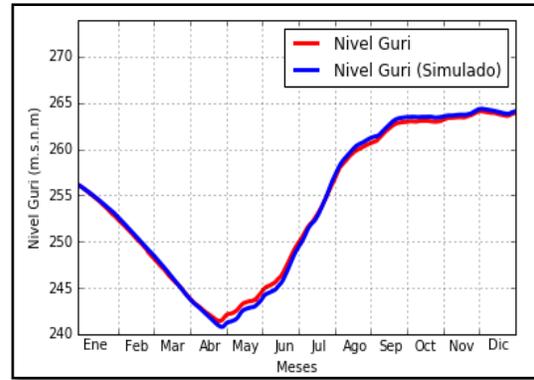


Figura 16: Resultados de la simulación para el periodo Ene-2016 / Dic-2016

3.1.2 Simulación predictiva del Embalse Guri

El objetivo es determinar los escenarios energéticos para los próximos 10 años considerando las series hidrológicas registradas (1950-2016), bajo las siguientes premisas:

- Periodo de simulación: 2017-2027.
- Nivel inicial del embalse de Guri 270,15 m.s.n.m para el 08/Ago/2017.
- Entrada en operación de la primera unidad de Tocoma el 01/Ene/2021, con la entrada de las unidades restantes cada 3 meses.
- Generación de las centrales del bajo Caroní: 200 GWh/día.

3.1.2.1 Series hidrológicas

Al realizar las simulaciones se pudo cuantificar las series hidrológicas que presentan mayor probabilidad de descargas por aliviaderos y déficit energético para este periodo de simulación.

3.1.2.1.1 Probabilidad de descargas por aliviaderos

La probabilidad de realizar descargas por aliviaderos se debe a que se alcanzó la curva de control de crecientes del Embalse Guri. La figura 71, se muestra el comportamiento del embalse con mayor probabilidad de descargas por aliviaderos. La serie hidrológica del año 2003, presenta mayor probabilidad [11].

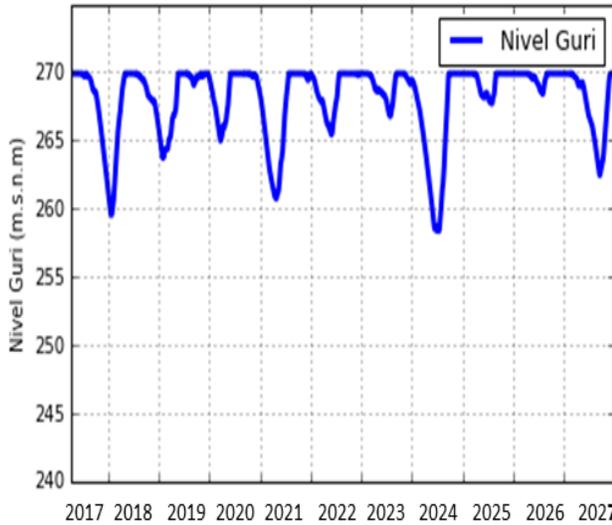


Figura 17: Comportamiento del nivel del Embalse Guri para la serie hidrológica 2003

3.1.2.1.2 Probabilidad de déficit energético

La probabilidad de presentar déficit energético se debe a la posibilidad de no poder suplir la demanda eléctrica debido a que se alcanzó el nivel mínimo del Embalse Guri. La figura 18, se ilustra el comportamiento del nivel del embalse para la serie hidrológica 1957, la cual presentó mayor probabilidad de déficit energético.

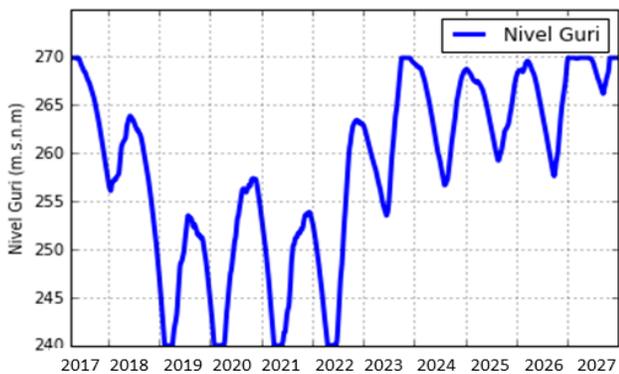


Figura 18: Comportamiento del nivel del Embalse Guri para la serie hidrológica 1957

3.1.2.1.3 Consumo

Es importante conocer la relación entre el consumo de agua y los caudales de aporte en el Embalse Guri, porque son factores que permiten llevar a cabo las simulaciones y estimar el comportamiento del nivel del embalse a tiempo futuro [12].

A continuación, se muestran las curvas del caudal turbinado y los caudales de aportes del Embalse Guri para las series hidrológicas 1957 y 2003.

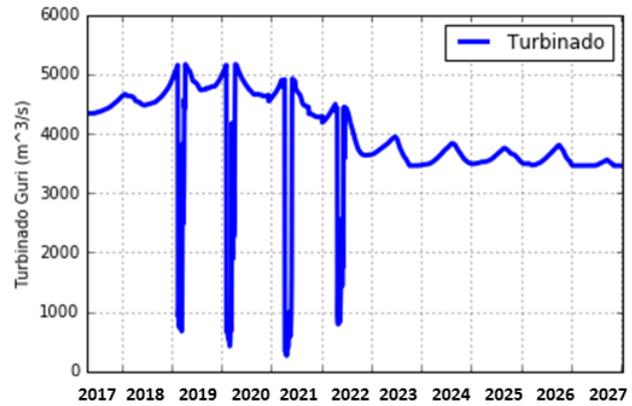


Figura 19: Turbinado Guri para la serie hidrológica 1957

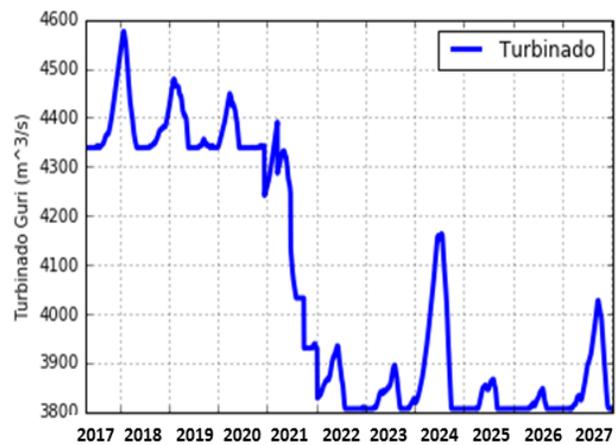


Figura 20: Turbinado Guri para la serie hidrológica 2003

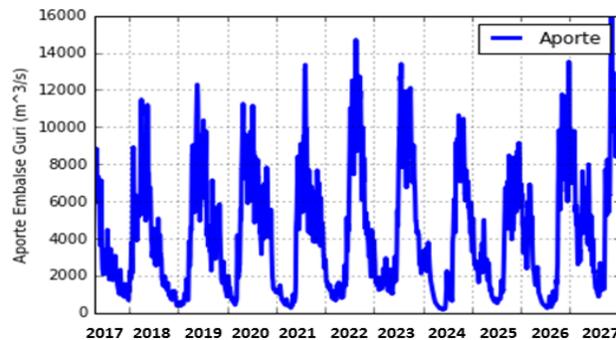


Figura 21: Caudales de aportes para la serie hidrológica 1957

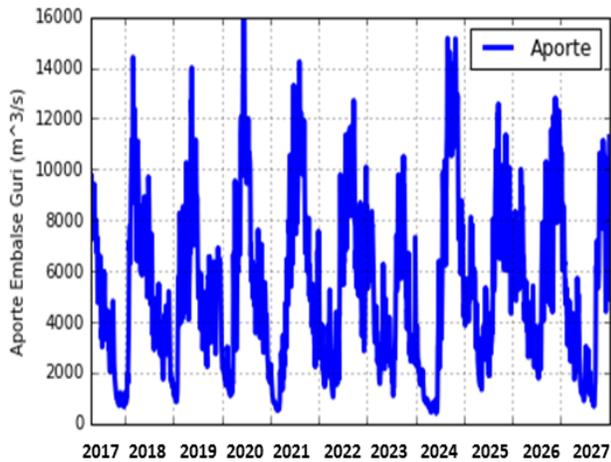


Figura 22: Caudales de aportes para la serie hidrológica 2003

En los resultados obtenidos de las simulaciones se puede observar la generación producida en las centrales. Una vez entrada en operación la central Tocoma, el caudal turbinado en las centrales Guri, Caruachi y Macagua disminuye, dado que la generación de Tocoma sustituye parte de la generación de estas centrales [13]. A continuación, se muestra en las figuras 22 y 23 las curvas de la generación en las centrales hidroeléctricas, para las series hidrológicas 2003 y 1957, presentando la mayor probabilidad de aliviado y de déficit energético.

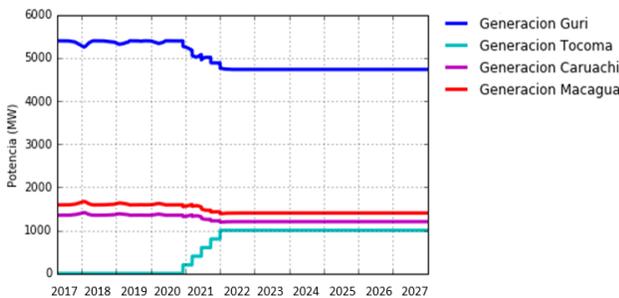


Figura 23: Generación en las centrales hidroeléctricas para la serie hidrológica 2003

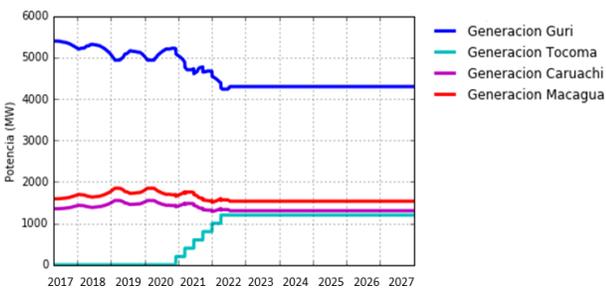


Figura 24: Generación en las centrales hidroeléctricas para la serie hidrológica 1957

LV. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]CORPOELEC, «Archivo Técnico. Central Hidroeléctrica Simón Bolívar (Guri).» Corpoelec, Guri, 2012.
- [2]EDELCA, «Archivo Técnico.» EDELCA, Guayana, 2009.
- [3]G. José, «El potencial hidroeléctrico nacional.» Caracas, 2015.
- [4]P. Juan, «Modelado de las características de embalses y centrales hidroeléctricas.» UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS, 2008.
- [5]L. Vizcaya, «Diseño de un programa para a simulación energética a largo plazo de las centrales hidroeléctricas operadas por EDELCA.» UNEXPO, Guayana, 2003.
- [6]E. Alcalá, «Evaluación de la planificación operativa del sistema interconectado nacional 2005-2009.» Caracas, 2007.
- [7]T. sara, «Modelado y control de una central hidroeléctrica.» Universidad de Sevilla, Sevilla, 2012.
- [8]CORPOLEC-EDELCA, «Situación actual del sistema eléctrico nacional.» CORPOLEC-EDELCA, Guayana, 2009.
- [9]J. Hurtado de Barrera, Metodología de la investigación, Caracas: : Ediciones Quirón-Sypal, 2015.
- [10] J. T. 8. Shipman, Rreference: a GUI for Python., 2013.