

## **CRITERIOS TÉCNICO – ECONÓMICOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CENTRAL COCA –CODO SINCLAIR**

Nestor Sandoval Zúñiga<sup>1</sup>, Byron Erazo Molina<sup>2</sup>, Leo Salomón Fash<sup>3</sup>.

Ingeniero en Electricidad, Especialización en Sistemas de Potencia, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2003.

Ingeniero en Electricidad, Especialización en Sistemas de Potencia, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2003.

Director de Tesis. Ingeniero en Electricidad, Especialización en Sistemas de Potencia, 1970. Maestría en Ingeniería Eléctrica, Rensselaer Polytechnic Institute, U.S.A., 1972. Profesor de la ESPOL desde 1972.

### **RESUMEN**

El presente trabajo proporciona al lector una visión global de lo que es un proyecto hidroeléctrico. Se toma como objeto de estudio al proyecto Coca - Codo Sinclair y se lo analiza desde el punto de vista técnico y económico. Además, como objetivo adicional al antes mencionado, en este trabajo se propone a la central Coca - Codo Sinclair como una posible solución al problema energético que vive el país.

La tesis a través de su primer capítulo nos muestra los antecedentes de este proyecto. Luego, en el segundo y tercer capítulo hace un recorrido a través de los principales elementos de la central desde un punto de vista técnico. Esto se lo hace aportando criterios operativos y de selección de equipos. Finalmente se toca el tema económico. En este último capítulo se analiza la rentabilidad que podría tener construir una central hidroeléctrica de gran tamaño en los actuales momentos, en nuestro país. Todo el trabajo está enmarcado en las actuales leyes vigentes para el sector eléctrico en el Ecuador.

### **INTRODUCCIÓN**

El objetivo del presente trabajo es establecer los procedimientos para el análisis técnico-económico de un proyecto hidroeléctrico de envergadura, tomando como elemento de aplicación al proyecto hidroeléctrico Coca - Codo Sinclair. El contenido del presente trabajo se enmarca dentro de la actual Ley de Régimen del Sector Eléctrico (LRSE) y criterios técnicos de varios autores. Además se analiza como en todo proyecto de inversión, el mercado, tanto frente a la competencia como en la demanda presente y futura proyectada.

La naturaleza de este trabajo es explicativa. Se muestra el procedimiento a seguir, incluyendo comparaciones con actividades realizadas en algunos puntos a tratar.

La necesidad de tratar este tema se fundamenta en los problemas surgidos en el país debido a la falta de energía y de como un proyecto de generación de

gran magnitud podría mejorar esta situación. Este proyecto debido a su tamaño y a su disponibilidad de energía durante todo el año, podría solucionar el déficit que el país posee en este tema. Además ayudaría a mejorar la confiabilidad del sistema, ante los problemas técnicos que posee la mayor central del país, Paute. Cabe resaltar que la energía que produciría esta central es barata y limpia.

Para mostrar el proyecto en cuestión, se especifican sus características tanto técnicas como económicas, en el nivel de profundidad que un trabajo de pregrado lo permite.

Debido a la naturaleza y fin del presente trabajo, se ha profundizado en los temas que guarden directa relación con electricidad y más aún, con la especialización de Potencia.

## **CONTENIDO**

## CAPÍTULO 1

### 1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

Para la ubicación de un proyecto de gran magnitud debe considerarse primeramente el recurso energético. El río debe ser uno que pueda ser represado considerando la geografía del embalse, que pueda aprovecharse un buen cabezal y que no tenga dificultad por cuestiones legales, como expropiación de terrenos y requerimientos ambientales. Además los riesgos naturales deben ser manejables.

Haciendo una descripción mas detallada de la zona del proyecto, se encuentra que la cuenca del río Quijos-Coca, comprendida entre las coordenadas  $0^{\circ} 45' S$  ,  $0^{\circ} 10' N$  y  $77^{\circ} 25' O$  ,  $78^{\circ} 15' O$  , y, entre las cotas 1290 m y 610 m, se desarrolla desde las líneas divisorias de las cadenas montañosas que mencionaremos, hasta la curva que hace el río Coca en el denominado Codo Sinclair.

## CAPÍTULO 2

### 2. IMPLEMENTACIÓN DE OBRAS GENERALES

En este capítulo se detallan las partes que constituyen la central Coca Codo – Sinclair. En las primeras secciones se mencionan las diferentes obras civiles con las que va a contar la central. Entre las principales características de esta central hidroeléctrica tenemos que no posee una gran presa de almacenamiento. Este proyecto más bien posee un sistema de captación de agua y un río con suficiente caudal para obtener un factor de planta de 0.8. Un factor de planta bastante alto para este tipo de centrales. Este último punto daría a lugar que esta central sea considerada como de base.

En las últimas secciones se describe al generador y la turbina. Se dan criterios de selección para ambos. Además se consideran criterios operativos al momento de escoger las características de cada uno de ellos. En esta parte se detallan todas las características eléctricas de la central.

## CAPÍTULO 3

### 3. PROTECCIONES Y SISTEMAS AUXILIARES

La frecuencia de fallas en generadores no es tan alta. El costo económico de un generador y lo perjudicial que sería perder una fuente de generación, por largo tiempo, para el sistema obligan a que se tome muy en cuenta las protecciones contra las diferentes fallas de un generador.

Un generador no solamente debe ser protegido contra cortocircuitos, sino también contra condiciones anormales de operación como se verá más adelante. Este se debe hacer sin sacar innecesariamente a la máquina de operación, ya que esto podría afectar al sistema. Para esto se deben ajustar de la mejor manera las protecciones del generador.

Se ha previsto en la central dos unidades de la primera etapa equipadas cada una con un transformador para servicios auxiliares de 4000 kVA. Esta capacidad es suficiente para alimentar todos los servicios de la central, del edificio de control, de las obras periféricas y de los campamentos. Entre los equipos auxiliares tenemos: Sistema de agua para enfriamiento, sistema de agua potable, sistema de aire comprimido, sistema de bombeo, sistema de circulación de aceite en los cojinetes, sistema contra incendios, sistema de ventilación y aire acondicionado y el sistema de drenaje. Todos ellos de gran importancia para el normal funcionamiento de la central.

## CAPÍTULO 4

### 4. Análisis Económico

El objetivo de este capítulo, dentro del objetivo general de este trabajo, es mostrar la metodología y los rubros implicados para la obtención de costos. Para esto se utilizan valores aproximados ya sea por analogías o experiencias varias.

Previo a tratar el análisis económico se realizará una descripción del mercado eléctrico actual. Su objetivo es justificar que la energía y potencia generadas en la central en cuestión, al momento del ingreso de la misma al sistema, puede ser vendida a una rentabilidad razonable. Esto es particularmente importante para la obtención del financiamiento.

Se realizará una comparación entre: los valores de demanda proyectada para la fecha de inicio de entrada en operación y la oferta de generación esperada para entonces (hidráulica y térmica).

## CONCLUSIONES

- 1) Este trabajo, usando al proyecto Coca – Codo Sinclair como ejemplo, hace un recorrido a través de diferentes enfoques de lo que es proyectar una central hidroeléctrica. Como se mostró, los temas técnicos están estrechamente ligados a los temas económicos, ya que de ambos depende que el proyecto se realice o no. En este trabajo se cumple el objetivo de juntar y seleccionar adecuadamente mucha información dispersa que existe acerca del tema. Con ello se dio al lector de esta tesis una visión global de lo que es una central de generación hidroeléctrica.
- 2) El aprovechamiento de las aguas del río Coca para generar energía eléctrica ha traído consigo el uso de un diseño innovador para este tipo de centrales. Este diseño fue el resultado de los estudios realizados en varios ámbitos de la ingeniería (geología, obras civiles, obras eléctricas, etc). Con este diseño se logró una central más confiable ante posibles eventos naturales causados por el volcán El Reventador.
- 3) Las obras de captación, por ser externas, podrían sufrir daño mínimos durante un proceso eruptivo. Debido a ello se decidió modificar el diseño original, en el que se incluía la construcción de una gran presa de arco, y se optó por la construcción de simples vertederos para la captación del agua. Esta decisión disminuyó la posibilidad de tener una mayor potencia eléctrica en el proyecto. A pesar de esto los 942 MVA que producirá esta central, hacen muy atractiva su construcción. Además se le debe sumar el hecho que tiene un factor de planta bastante alto (0.8), lo que garantizará que esta central estará operando durante casi todo el año.
- 4) La casa de máquinas al igual que los transformadores serán subterráneos. Con esta medida se protegerá a los equipos contra cualquier evento eruptivo. Los equipos se conectarán al sistema por medio de una subestación aislada por SF<sub>6</sub>. Esto encarecerá los costos de los equipos que constituyen a la subestación, pero disminuirá los gastos en lo relacionado a la obra civil para esta, debido a la menor demanda de espacio.
- 5) La potencia de cada unidad de generación será de 144 MW. Esta cantidad no va en contra de ninguno de los criterios de selección mencionados en este trabajo. Es decir no afectará negativamente al S.N.I en lo relacionado a la estabilidad de este, ni es una potencia mucho mayor a la potencia de la mayor unidad conectada al sistema actualmente. Esta central a su vez dará una mayor confiabilidad al S.N.I proveyéndolo de una mayor cantidad de energía disponible.
- 6) Las características de diseño de la turbina incidirán en el diseño del generador. Esto dependerá a su vez de la energía aprovechable del recurso y de los requerimientos del sistema en lo concerniente a generación reactiva y nivel de voltaje. Las curvas de capacidad del

generador muestran como este operará ante diversos requerimientos de la carga.

- 7) La relación de cortocircuito se preferirá ligeramente alta para mejorar la regulación de la tensión ante cambios súbitos de carga. Pero no se deberá diseñar exclusivamente en base a este criterio, ya que como se vio en la tabla VI del presente trabajo, esto encarecería los costos del generador y se sacrificaría los valores de otros parámetros. Además cabe resaltar que es preferible enfrentar la variación súbita de carga mediante el regulador de tensión del generador.
- 8) El factor de potencia de cada unidad será de 0.90. Este valor se lo escogió de acuerdo a los requerimientos del sistema y a las características operativas de la línea de transmisión a la que estará conectada la central.
- 9) La reactancia transiente es una medida de estabilidad de la máquina. Es preferible un valor bajo de reactancia transiente para mejorar la estabilidad. En el presente trabajo se recomienda el uso de devanados de amortiguamiento y de un regulador de frecuencia de respuesta rápida ante variaciones de carga, para mejorar la estabilidad. Esto en vez del aumento de la reactancia transiente, que ocasionaría mayores costos en la construcción de la máquina y un aumento en el peso de esta.
- 10) La eficiencia de cada generador será de 0.986. Esta eficiencia alta se justifica, ya que menores eficiencias producirían mayores pérdidas, menos ingresos y además generarían más calor dentro de la caverna. Esto volvería menos rentable al proyecto y dificultaría el enfriamiento de la caverna.
- 11) La característica  $PD^2$  del generador es un valor importante para los estudios de estabilidad del sistema. Se prefiere valores altos de  $PD^2$  y por consiguiente de H (constante de inercia) también, para mejorar la estabilidad en el sistema. Esto se debe a que estos valores limitarán los cambios bruscos de velocidad ante cambios súbitos de carga. Cabe indicar que un aumento de estos valores se lo debe hacer estrictamente de acuerdo a los requerimientos del sistema. Esto se debe a que a mayor  $PD^2$ , mayor tamaño y peso de la máquina, lo cual encarecería los costos de la obra.
- 12) Tres transformadores monofásicos de 53.3 MVA cada uno se instalarán en vez de uno solo trifásico de 160 MVA por cada generador. La primera opción se escogió debido a las dificultades de transporte de la unidad trifásica. Esto se debe a que el peso de esta unidad junto al peso del transporte sobrepasaría la capacidad de las vías de acceso al sitio de instalación.
- 13) En caso de fallo definitivo de la central de Hidropaute por desprendimiento del estribo o deslizamiento intensos, la central en

cuestión sería de gran ayuda para satisfacer la demanda sin atender que dejaría tal acontecimiento.

- 14) En el diseño de las protecciones se intentó minimizar la ocurrencia de la salida de cada unidad, sobre todo en las protecciones de pérdida de campo y sincronismo.
- 15) En la protección de pérdida de sincronismo deben permitirse las oscilaciones estables, para esto la única alternativa viable es la utilización de un relé de dos zonas.
- 16) Debido a la existencia de varias zonas de algunos relés (zona se alarma y de disparo), se justifica la inclusión de un panel de alarma en el cuarto de tableros del edificio de control.
- 17) Los transformadores para los servicios auxiliares cumplen la función de regular y mantener constante el voltaje de salida (13.8 KV), con respecto al de entrada, que es el voltaje en los terminales del generador (13.8 KV).
- 18) Los equipos y obras de servicios auxiliares son implementados casi en su totalidad en la primera etapa. Esto implica mayor atractivo para la construcción de la segunda etapa, en la cual los costos por este concepto serían mucho menores.
- 19) Puede observarse el pequeño valor de costo para la energía, basándose en el reglamento del MEM actualizado al 2000 para el establecimiento de tales parámetros. De aquel se puede concluir que no es del todo injusto para la central, ya que tanto el pago de la inversión como el de los costos fijos por operación y mantenimiento son cancelados a través del pago por potencia. El pago por energía para las centrales hidroeléctricas constituye el reembolso de sus costos variables más valores de oportunidad.
- 20) Se puede observar en base a los resultados de precio de Kwh generado, que el valor a liquidar a esta central, en condiciones actuales de valoración, sería muy superior al valor que se obtiene de aplicar la normativa respectiva.
- 21) El precio promedio por energía está por encima del precio establecido para la central en estudio.
- 22) La energía y potencia generados serían necesarios inclusive desde este momento, dada la gran cantidad actual de generación térmica. En base a las proyecciones de demanda y la planificación de oferta futura, se avizora una urgencia en la implementación de centrales base de gran potencia.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1) BERDY JHON, "Out of Step Protection For Generators", GER-3179, Electric Utility Systems Engineering Department, General Electric C.
- 2) BLACKBURN J.L., "Applied Protective Relaying", Westinghouse Electric Corporation.
- 3) BROWN P.G., "Generator Protection with a New Static Negative Sequence Relay", GER-3181, General Electric C.
- 4) CONELEC, Plan Maestro de Electrificación 2002-2011, [www.conelec.gov.ec](http://www.conelec.gov.ec)
- 5) CONELEC, Estadísticas del Sector Eléctrico 2000, [www.conelec.gov.ec](http://www.conelec.gov.ec)
- 6) CONELEC, Reglamento del MEM (Reforma 22 Julio del 2002), [www.conelec.gov.ec](http://www.conelec.gov.ec)
- 7) EX INECEL, "Estudio De Prefactibilidad del Proyecto hidroeléctrico Coca – Codo Sinclair"
- 8) EX INECEL, Oferta de Energía Eléctrica – Sector Eléctrico Ecuatoriano
- 9) FINK DONALD G. / BEATY H. WAYNE, "Manual de Ingeniería Eléctrica", Decimotercera Edición, Volúmenes II y III, Editorial Mc Graw Hill.
- 10) KOSOW IRVING L., "Máquinas Eléctricas y Transformadores", Segunda Edición, Editorial Prentice Hall Hispanoamérica S.A.
- 11) LIWSCHITZ – GARIK MICHAEL / WHIPPLE CLYDE C., "Máquinas de Corriente Alterna", Compañía Editorial Continental S.A. México.
- 12) MASON C. RUSSEL, "The Art and Science of Protective Relaying", General Electric C.
- 13) MOZINA CHARLES, "Mejoramiento de la Protección de Generadores Usando Tecnología Digital", Canadian Electrical Association.
- 14) ORTEGA JUAN MARÍA / RAMÍREZ JOSÉ, "Máquinas de Corriente Alterna", Enciclopedia CEAC de Electricidad.
- 15) POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE IEEE, "Tutorial de la IEEE de Protección de Generadores Síncronos", IEEE.
- 16) RAMÍREZ JOSÉ, "Centrales Eléctricas", Enciclopedia CEAC de Electricidad.
- 17) U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, "Hydroelectric Power Plants, Electrical Desing". Manual EM 1110-2-3006.

- 18) SAUER W. PETER / PAI M.A., "Power System Dynamics and Stability", Editorial Prentice Hall.
- 19) STEVENSON WILLIAM D. / GRAINGER JHON J., "Análisis de Sistemas de Potencia", Editorial Mc Graw Hill.
- 20) ZOPPETTI GAUDENCIO, "Centrales Hidroeléctricas", Editorial Gustavo Gili S.A.

---

Ing. Leo Salomón Fash  
DIRECTOR DE TESIS