

OPTIMIZACIÓN EN EL PROCESO DE RESTAURACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Roberto Barba
Dirección de Operaciones

RESUMEN

El presente trabajo analiza uno de los procesos más críticos en la operación de sistemas eléctricos de potencia; este proceso es la restauración del mismo luego de haberse presentado un colapso o pérdida de servicio.

La resolución se la realiza a través de la formulación del problema del camino más corto, y los resultados teóricos se los compara con los resultados de la aplicación del proceso de restauración en la operación en tiempo real.

PALABRAS CLAVE: Caminomás corto, Restauración de sistemas eléctricos de potencia.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos que persiguen los procesos de toda índole (industriales, informáticos, financieros, militares, etc.) desarrollados alrededor del mundo es la optimización de los recursos utilizados, entendiéndose por recursos tanto los físicos, financieros, humanos, así como el tiempo.

La administración de mercados eléctricos, proceso en auge en Latinoamérica, no es la excepción. Se tiene que de manera permanente es necesario realizar actualizaciones, o reformulaciones de los procesos involucrados, de tal manera que el costo al usuario final del producto, la energía eléctrica, sea el mínimo y además que dichos procesos avancen armónicamente con el desarrollo de los mercados eléctricos, definidos por los procesos de globalización mundial. En este contexto se tiene un sinnúmero de estudios: desarrollo de modelos, adaptación de modelos, tanto en el ámbito comercial como en el técnico.

Se puede mencionar por ejemplo, la optimización en la programación del parque generador, persiguiendo la reducción de los costos de producción, el desarrollo de portafolios óptimos que minimicen

el riesgo en el manejo del bien eléctrico, que es la energía eléctrica.

En el campo técnico, directamente relacionado con la planificación y la operación en tiempo real de un sistema eléctrico, se pueden encontrar aspectos referentes a la seguridad, continuidad del servicio e incluso aspectos que tienen estrecha relación con la minimización de los costos finales del producto. Por ejemplo: la distribución óptima de los recursos para el control de voltaje y sus tiempos óptimos de operación; la distribución óptima de la generación en una zona con saturación de red.

2. GENERALIDADES

La continuidad del suministro es un aspecto muy importante en la operación de sistemas eléctricos. Si por algún motivo, se pierde estabilidad en los niveles de seguridad del sistema, pueden producirse una serie de eventos que causen la interrupción parcial o total del servicio eléctrico. Los así llamados **apagones** causan inconformidad a los usuarios finales de manera inmediata; involucrando además costos sociales, pérdida de productividad que en el sector eléctrico se los conoce como “**costos de la energía no suministrada**”. Y considerando que el proceso de restauración de un sistema eléctrico depende de muchos factores, por ejemplo la topología final del sistema, los elementos disponibles para la reposición, y de la experiencia del personal técnico responsable, el proceso de restauración **actualmente** se torna complejo y hasta cierto punto subjetivo.

Con el objetivo de minimizar el impacto de los factores antes mencionados en el proceso de restauración, es muy importante disponer de personal técnico entrenado y de herramientas que minimicen la utilización de criterios subjetivos. Para contestar la siguiente pregunta, ¿el camino de restauración escogido fue el óptimo?, se propone la metodología descrita en este artículo.

3. RESTABLECIMIENTO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA.

3.1. Criterios de Seguridad, Calidad y Confiabilidad de Servicio

La operación del SNI debe considerar los parámetros de calidad y seguridad establecidos en las regulaciones del CONELEC.

- **Criterios de Calidad de Voltaje**

El control de voltaje y potencia reactiva es una responsabilidad compartida por todos los actores de un sistema eléctrico. Los valores de voltaje máximos y mínimos permitidos en los diferentes puntos del sistema, están establecidos como una banda de tolerancia referida al Valor Nominal para cada nivel de voltaje, tanto para condiciones normales como para condiciones de emergencia.

- **Criterios de Seguridad**

En la etapa de planificación eléctrica se definen los lineamientos de seguridad, a través de simulaciones, previsiones, etc., que deberán cumplirse en la ejecución del proceso de operación en tiempo real. Estos parámetros de seguridad deben cumplirse inclusive cuando luego de una contingencia el sistema alcance un nuevo punto de equilibrio.

- **Criterios de Continuidad de Servicio**

La continuidad de servicio dentro de la normativa del MEM ecuatoriano no está incluida de manera explícita como un criterio de calidad de servicio, pero la concepción general de la administración técnica del Mercado, que contempla las etapas de planificación y operación en tiempo real, busca cumplir con este objetivo macro.

En las regulaciones de MEM se establece de manera general que, "El CENACE deberá realizar la supervisión de la seguridad, continuidad, calidad y economía en forma constante...", mientras que en condiciones de emergencia se indica que uno de los objetivos de los procedimientos del MEM es "... el reducir al mínimo posible el tiempo de restablecimiento del SNI, considerando prioritario la integridad de las personas, la conservación de los equipos y la continuidad del servicio".

3.2. Operación en Condiciones de Emergencia

Un sistema de potencia se encuentra en condiciones de emergencia cuando: se ha producido: un evento que interrumpe el servicio de suministro de energía; o el servicio continúa pero con sus variables fuera de los límites prefijados.

3.3. Contingencias en Sistemas Eléctricos

Se considera como base de análisis la modificación topológica de la red eléctrica.

- **Contingencias Localizadas**

Separación y desenergización de un único elemento del SNI, cuya indisponibilidad no causa consecuencias en otros elementos del sistema.

- **Contingencias Zonales**

Separación y desenergización de varios elementos del SNI, definidos generalmente por una zona geográfica, o política, por ejemplo la zona sur del país corresponde a las provincias de Azuay y Loja.

La indisponibilidad causada considera varios puntos de interconexión a una misma empresa eléctrica, inclusive puede comprender más de un agente.

- **Colapso Total**

Pérdida de generación y carga en todo el SNI, incluyendo interconexiones internacionales; es decir, pérdida de sincronismo del sistema completo. Este es el evento más severo que puede soportar un sistema eléctrico de potencia.

3.4. Metodología de Restablecimiento

Contempla la conformación de un conjunto de caminos para el flujo de la electricidad, partiendo desde uno o varias fuentes de energía determinadas, hasta alcanzar la barra de alimentación al distribuidor. Este proceso consistirá de la ejecución de muchas maniobras; tanto de conexión/desconexión de elementos eléctricos, como de acciones de control necesarias para mantener los parámetros de calidad de servicio y de seguridad del sistema.

De esta manera general se puede decir a priori que, mientras menos elementos intervengan en el proceso de energización, el camino de restauración será mejor y más ágil.

Actualmente la selección de los caminos de restauración se realiza manualmente, de acuerdo al criterio del personal técnico y su grado de experiencia.

- **Fuentes Alternativas para Restablecer un Sistema**

El proceso de selección de un camino de restablecimiento del servicio de energía eléctrica depende en gran escala de la fuente de energía desde la cual se inicia el proceso de restauración. En un sistema de potencia se presentan dos tipos de fuentes de energía iniciales:

- * Barras o líneas energizadas.
- * Arranque en negro de generadores.

- **Proceso de Restauración**

Considerando que los parámetros de calidad y seguridad del sistema han sido estabilizados, se debe proceder a restaurar la parte de la red del sistema

eléctrico de potencia que quedó sin voltaje o fuera de servicio, para ello se considera las siguientes acciones:

- * Establecer los puntos del sistema que ofrecen la entrega primaria de voltaje (generadores, barras energizadas, líneas de transmisión energizadas).
- * Identificar las barras del sistema con prioridad de energización.
- * Establecer las rutas de energización para dichas cargas.
- * Ejecutar el proceso de restauración, considerando la estrategia establecida:
- * Cierre de líneas de transmisión,
- * Control de los niveles de voltaje.
- * Energización de barras de transferencia de energía y equipos de transformación.
- * Energización de los puntos de interconexión con las empresas distribuidoras.

4. EL PROBLEMA DE LA OPTIMIZACION

4.1. Problema del Camino Más Corto

El objetivo es hallar el camino del menor costo posible o de menor longitud, a partir de un nodo fuente dado (**S**) hacia un nodo sumidero (**t**). Como ejemplo de aplicaciones simples se tiene, la determinación del camino de longitud más corta entre dos pueblos de una provincia.

Considerando la formulación del problema mediante la programación lineal se tiene que:

Sea la red $G = (N, A, C_{ij})$ o simplemente (N, A)
Donde:

N = Conjunto de n nodos.

A = Conjunto de m arcos.

C_{ij} = Longitud del arco (i, j) .

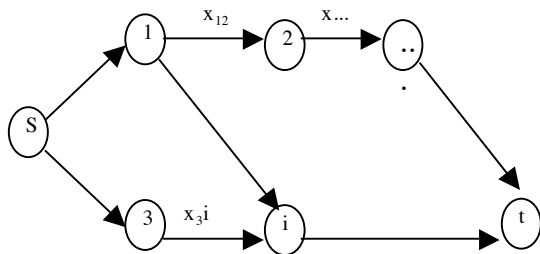


FIGURA 1: Ejemplo de Una Red

Variable de Decisión

Las variables de decisión en el presente problema son las variables binarias (x_{ij}) relacionadas con cada uno de los arcos $(i, j) \in A$. Los valores para la variable x_{ij} serán: 0 si el arco (i, j) no está en el camino más corto, y 1 si lo está.

Función Objetivo

El objetivo fundamental es minimizar la longitud (el tiempo) en movilizarse entre dos nodos, de esta manera, el objetivo será.

Minimizar:

$$Z = \sum_{(i,j) \in A} C_{ij} \cdot x_{ij}$$

Restricciones

Restricción de Grado Saliente, se debe cumplir que solamente un arco perteneciente al camino más corto puede salir del *nodo fuente* (s), es decir **Grado⁻ (s) = 1**.

$$\sum_{(j:(i,j) \in A)} x_{ij} = 1 \quad i = s$$

Conservación de Flujo, se debe cumplir que para todo nodo perteneciente al camino más corto, ninguno de ellos puede ser colgante.

$$\sum_{(j:(i,j) \in A)} x_{ij} - \sum_{(j:(j,i) \in A)} x_{ji} = 0 \quad \forall i \in N - \{s\} - \{t\}$$

Formulación Completa

$$\text{Min: } Z = \sum_{(i,j) \in A} C_{ij} \cdot x_{ij}$$

Subject To:

$$\sum_{(j:(i,j) \in A)} x_{ij} = 1 \quad \forall i = s$$

$$\sum_{(j:(i,j) \in A)} x_{ij} - \sum_{(j:(j,i) \in A)} x_{ji} = 0 \quad \forall i \in N - \{s\} - \{t\}$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A$$

5. ADAPTACIÓN DEL PROBLEMA

Se interpreta la red eléctrica, su topología, sus requerimientos, sus restricciones, a través de la teoría de optimización.

5.1. Análisis Topológico del Problema Real

Luego de una contingencia la red eléctrica desenergizada resultante, puede presentar diferentes estructuras topológicas definidas por los siguientes

casos: Una fuente un usuario, una fuente varios usuarios, varias fuentes un usuario y el caso general varias fuentes varios usuarios. Como un ejemplo se presenta la descripción del caso último.

- **Caso. Varias Fuentes y Varios Usuarios**

Se presenta cuando en el sistema se produce una contingencia zonal o un colapso total. Se tienen varias cargas por energizar y se disponen de varias fuentes de energía.

Considerando la figura 2, a partir de las fuentes de energía S1, S2 y S3, existen varias opciones de caminos para llegar a las diferentes cargas R1, R2 y R3, de los cuales uno de ellos será el camino más corto. Detallando uno de los caminos se tendría: partiendo del nodo fuente S1 (barra energizada), cerramos la línea de transmisión (L/T) que conecta a la barra 3, se energiza el transformador T1 que conecta la barra 5, cerramos la L/T que conecta la barra 6, por último cerramos la L/T que energiza la carga R1.

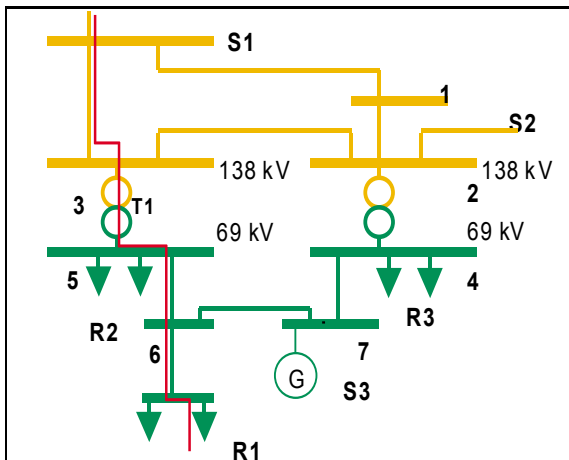


FIGURA 2: Caso Varias Fuentes Varios Usuarios

Para una falla total del sistema dado en la Figura 2, se tiene la siguiente red topológica equivalente.

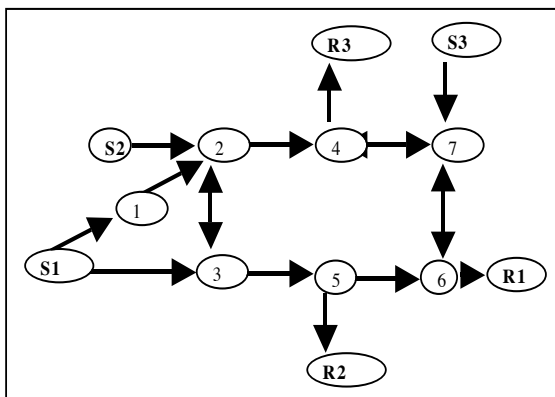


FIGURA 3 : Representación Caso Varias Fuentes Varios Usuarios

5.2. Análisis y Adaptación de las Restricciones

- **Niveles de voltaje**

En un sistema eléctrico cuando se quiere llevar energía a otro punto, se lo realiza a través de un transformador o una línea de transmisión. El efecto eléctrico circunscrito a esta maniobra es el aumento del voltaje en la parte de influencia de dicha línea, por lo que para evitar cualquier trasgresión de la banda establecida, se hace necesario realizar de manera previa varias maniobras de control; por ejemplo, bajar el nivel de generación de potencia reactiva desde un generador o compensador sincrónico, o conectar un dispositivo estático que controle voltajes. Para el modelo de optimización esto significa que, **para ciertos puntos de conexión se deben añadir los pesos (tiempos) esperados de proceso correspondientes a la ejecución de las maniobras de control indicadas.**

Estos tiempos dependen de varios factores, como por ejemplo, tipo de central, tipo de control (remoto o local), de la magnitud de la línea de transmisión a cerrar.

- **Capacidad de Líneas de Transmisión**

El objetivo de este estudio, es determinar las estrategias óptimas para llegar a todas las barras del sistema; estrategias dadas por las rutas más cortas. Los procesos subsiguientes se los realiza en base a las rutas ya establecidas, las que ofrecieron la mayor agilidad para llegar a una cierta barra, considerando que los pasos prioritarios del proceso de restauración son el abastecimiento a las cargas especiales, se establece un consumo inicial que no causa problemas en las capacidades de las líneas de transmisión. **Con esta consideración, esta restricción no se activaría.**

- **Capacidad de Unidades Generadoras**

Considerando el análisis establecido en el literal anterior, durante la primera fase de la reconexión, **la capacidad de una unidad generadora no es una limitante real en la determinación de la ruta más corta.** Esto se entiende considerando que el requerimiento de potencia de las cargas especiales es mínimo con respecto al requerimiento del sistema global.

- **Indisponibilidad de Elementos**

Por simplicidad en la implementación del modelo, la representación de los elementos indisponibles se la realizará asignando un peso (tiempo) infinito al arco respectivo.

5.3. Características Requeridas del Problema a Resolver

- Puede ser necesario definir los **nodos sumideros de manera preferencial.** Dar servicios auxiliares

a las plantas de vapor es prioritario en el proceso de restauración.

Solución.- Se resuelve el problema completo y se considera en primera instancia los caminos más cortos correspondientes a las cargas esenciales.

- Definir **varios nodos fuente**; se presenta cuando se tienen varias fuentes de energía para una misma red a restaurar.

Solución.- Todos los nodos fuente se los puede enlazar con un **súper nodo fuente** a través de arcos de costo cero y el problema no se verá alterado.

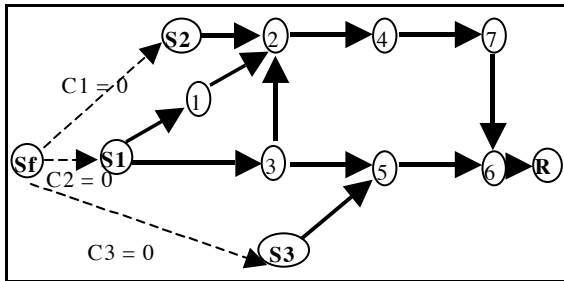


FIGURA 4: Solución Caso Múltiples Fuentes

- Definir **varios nodos sumidero** dentro de una misma red; este sería el caso en el cual se tiene diferentes usuarios (cargas) para los cuales hay que normalizar el servicio.

Solución.- El árbol de caminos más cortos (conjunto de caminos más cortos) formado, contendrá en cada nodo el tiempo mínimo (peso mínimo), de esta manera en cada barra (nodo sumidero), se tendrá determinado el tiempo que deberá esperar un usuario para que le sea energizado el punto de alimentación.

- Tiempos de Maniobra** de los disyuntores de líneas de transmisión o de transformadores.

Solución.- Se consideran como costos asignados a los arcos que los representan. El tiempo de ejecución de una maniobra dependerá de las características de controlabilidad del dispositivo a maniobrar. En el SNI existen dispositivos con supervisión y con capacidad de ser controlados remotamente y otros que no disponen ni siquiera de la característica básica de supervisión.

- Magnitudes de voltaje iniciales al reconectar líneas de transmisión.

Solución.- Estas magnitudes se las puede transformar en costos adicionales a los costos por maniobras, a una mayor magnitud de voltaje que quede fuera de la banda permitida, las maniobras para compensar dicho voltaje añadirán tiempo

adicional al proceso de reconexión de la línea (arco), de esta manera el tiempo (costo) será mayor.

- Tiempos de arranque en negro** de las unidades de generación.

Solución.- Se asignan costos equivalentes al tiempo requerido para el arranque de la unidad.

5.4. El Algoritmo de Dijkstra

Busca el árbol de caminos más cortos a partir de cualquier nodo hacia todos los otros nodos de una red en una sola ejecución.

Algoritmo

Sea $G = (N, A)$ una red

Definición del nodo SUPERFUENTE (V_{SF})

Añadir un nodo V_{SF} al conjunto N

Definición de los arcos ficticios de costo cero desde el nodo (V_{SF}), hacia cada una de las fuentes (V_{Si}).

Para cada $V_{Si} \in S_i$ (conjunto de fuentes) **hacer**

Añadir un arco $(V_{SF}, V_{Si}) \in A$

Costo $(V_{SF}, V_{Si}) = 0$

Fin Para

Inicialización de la tabla de datos

$dV_{SF} = 0$ (costo del nodo fuente)

$dV_{Si} = 0$ Para todo $V_{Si} \in S_i$ (conjunto de fuentes)

$d_j = \infty$ Para todo $j \in N - S_i$ (conjunto que no son fuentes)

Hallamos el camino más corto para todos los nodos ($N - S_i$)

$T = N - S_i$ (nodos no considerados en ninguno de los caminos más cortos)

Para **cada** $i = 0$ a $N - S_i$

Hallar $vm \in T$, tal que dm sea mínima (hallar un nodo vm tal que el costo dm de ir desde la fuente hacia dicho nodo sea la mínima)

Para **cada** arco (vm, vt) , con $vt \in T$

Si $(dt > dm + \text{costo}(vm, vt))$, entonces $dt = dm + \text{costo}(vm, vt)$

Fin Para

$T = T - vm$

Fin Para

Fin

5.5. Condiciones de Aplicabilidad

La aplicación del algoritmo de Dijkstra exige de una red las siguientes características:

- **Arcos orientados o no orientados.** Las líneas de transmisión y los elementos de transformación pueden conducir electricidad en los dos sentidos. De esta manera se los representa a través de dos arcos con sentidos opuestos, cuyos terminales son comunes.
- **Arcos ponderados o no ponderados.** La ponderación está dada por los tiempos de maniobra como por los tiempos de regulación de voltajes.
- Si los arcos son ponderados, el **valor del costo debe ser no negativo.**

6. PROBLEMA DE APLICACIÓN

Se aplicó el modelo desarrollado al caso del colapso total del SNI ecuatoriano ocurrido el 12 de abril de 2004. Se considera casos particulares de la red de distribuidores en las cuales se encuentra embebida generación importante. Se diferencia las unidades que poseen arranque en negro (con sus propios medios). Se consideran las barras de interconexión internacional con el sistema colombiano.

Los tiempos de proceso asociados a cada uno de los equipamientos del sistema se obtienen a partir de valores típicos manejados en la operación rutinaria del sistema.

6.1. Árbol de Caminos Más Cortos

Se obtiene el árbol de los caminos más cortos para la restauración del servicio en todas las barras del SNI. En la tabla 1, a partir del árbol general, se extracta como un ejemplo⁴ la información referida a la zona eléctrica alimentada desde la S/E Jamondino.

TABLA 1: Zona Pomasqui – Santa Rosa

Nodo Inicial.		Nodo Final.		C o s t o Total
No.	Nombre	No.	Nombre	
0	Súper Nodo Fuente	1	Jamondino	0
1	Jamondino	2	Pomasqui 230	400
2	Pomasqui 230	3	Santa Rosa 230	520
2	Pomasqui 230	77	Pomasqui 138	500
3	Santa Rosa 230	4	Santo Domingo 230	700
4	Santo Domingo 230	31	Santo Domingo 138	800
31	Santo Domingo 138	32	Santo Domingo 69	900
31	Santo Domingo 138	33	Esmeraldas 138	1010
33	Esmeraldas 138	34	Esmeraldas 69	1110

⁴ Por razones de espacio no se presenta la tabla completa que representa el árbol de caminos más cortos.

Cada fila indica la barra inicial y la barra final de las L/T's o transformadores que forman parte del árbol, además el tiempo total de restauración acumulado en la barra final:

El subsistema estructurado en el proceso de restablecimiento real del pasado 12 de abril de 2004, coincide con todas las subestaciones indicadas en el resultado de la corrida de la aplicación, a excepción de la barra de 230 kV de la S/E Riobamba y consecuentemente la barra a 69 kV de la misma subestación, las cuales si tomaron energía desde Jamondino en el proceso real.

7. CONCLUSIONES

Al aplicar el modelo de optimización en el SNI ecuatoriano para el caso de un colapso total, se pudo comprobar varias hipótesis y obtener resultados valiosos, que al momento se han considerado en la estructuración del procedimiento respectivo⁵, los aspectos considerados son:

- Se resuelve el problema de la determinación de las rutas más cortas hacia cada una de las barras de carga del sistema, desde el punto de vista de la minimización de los tiempos de energización de las instalaciones. Esto tiene aplicabilidad en la fase inicial del proceso de restauración, donde la capacidad de la red no es limitante y el objetivo prioritario es proveer de energía a las cargas críticas del sistema.
- Validez de la estrategia de restauración por zonas eléctricas, que hasta antes de este estudio no había sido posible comprobar su optimalidad. Los resultados concuerdan en alto grado con aquellos obtenidos en un caso real de restablecimiento del sistema ecuatoriano luego del Colapso Total, ocurrido el 12 de abril de 2004.
- Se determinó que la interconexión con Colombia 230 kV es la fuente más rápida para abastecer de energía a la zona Jamondino (norte del país) y por ende al sistema ecuatoriano.
- La aplicación del algoritmo de Dijkstra al problema de restablecimiento de sistemas de potencia, se transforma en una herramienta funcional que puede potencialmente ser aplicada en la operación tiempo real del SNI.
- En base a lo revisado en varias fuentes de bibliografía (internet especialmente) y realizadas consultas de manera personal, podemos afirmar que la aplicación desarrollada en el presente estudio es un trabajo pionero en América Latina.
- La aplicación puede manejar casos en los que se presenta un contratiempo en línea, como por

⁵ Cabe indicar que los resultados obtenidos en la tesis referencia de este artículo fueron presentados previo la actualización de los procedimientos para el colapso total y previo al colapso del 12 de abril de 2004.

ejemplo un arranque fallido de una unidad con capacidad para arranque en negro. Bajo esta circunstancia se deberá excluir del modelo dicha fuente, y ejecutar nuevamente el algoritmo de optimización.

8. RECOMENDACIONES

El algoritmo implementado podría aplicarse en un entorno en tiempo real, considerando la renovación del sistema de control del CENACE, que presentará facilidades para el acceso a los datos requeridos.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ROBERTO BARBA, "Optimización en el Proceso de Restauración de Sistemas Eléctricos

de Potencia"- Tesis previa la obtención del título Magister en Investigación Operativa, Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador, Septiembre 2004.



Roberto Barba Barba, nació en Quito, Ecuador, en 1968. Obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 1996 y recibió el grado de Magíster en Investigación Operativa de la Escuela Politécnica Nacional en el año 2004. Actualmente se desempeña como Supervisor en la Dirección de Operaciones del Centro Nacional de Control de Energía. Su campo de acción es la coordinación de la operación en tiempo real del Sistema Nacional interconectado.