

PLANIFICACION DE LA TRANSMISION EN UN SECTOR DE LA RED VENEZOLANA QUE POSEE ALTO GRADO DE DESCONEXION

Ramon Villasana, PhD
Universidad Simon Bolivar
Caracas, Venezuela

Mauricio Drrellana, Ing.
ASINCRD, C.A.
Caracas, Venezuela

Juan Carlos Ledezma, Ing., Msc.
ASINCRD, C.A.
Caracas, Venezuela

Fidel Perez, Ing.
EDELCA, C.A.
Caracas, Venezuela

RESUMEN

En este artículo se presenta en forma sistemática el resultado de la aplicación de un modelo interactivo de planificación óptima de redes de transmisión, desarrollado como herramienta para resolver problemas en planificación en redes con bajo grado de conexión física original, obviando el hecho de definir líneas desechables. El modelo se aplica al diseño a largo plazo de un sector del sistema de transmisión de la red interconectada de Venezuela. Este sector atiende a una zona donde se prevee un acelerado crecimiento industrial y para el cual se conocen decisiones sobre nuevas instalaciones de generación. La ejecución del modelo se realiza en microcomputador.

ABSTRACT

This article shows the result of applying a Microcomputer Interactive Power Transmission Network Planning Model, developed to solve for the long range and strategic circuit reinforcements, for an area of the Venezuelan Interconnected Power System characterized by an original highly disconnected status. That area is anticipated with an intense industrial growth for which new generation facilities are already known.

INTRODUCCION

Es criterio ya generalizado entre planificadores de redes de transmisión, el definir un plan referencial a largo plazo, que sirva de orientación a la estrategia de diseño de la red a través de los años.

En la estructura de ese plan orientador, el ingeniero usualmente se enfrenta al problema del diseño de una red futuro que en su estado actual se encuentra muy desconectada. Esta condición dificulta la aplicación de técnicas básicas de análisis de redes.

Muchos modelos actuales de planificación de sistemas eléctricos de transmisión de potencia en su afán de conseguir conexión a la red en su origen, plantean nexos desechables sin costo ni capacidad eléctrica.

En este artículo se presenta en forma sistemática el resultado de la aplicación de un modelo interactivo de planificación óptima de redes de transmisión desarrollado como herramienta para resolver problemas de planificación en redes de bajo grado de conexión física original, obviando el hecho de definir líneas desechables. El modelo se aplica al diseño a largo plazo de un sector del sistema de transmisión de la red interconectada de Venezuela. Este sector atiende a una zona donde se prevee un acelerado crecimiento industrial y para el cual se conocen decisiones sobre nuevas instalaciones de generación. La ejecución del modelo se realiza en un microcomputador.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para la próxima década (hasta el año 2001) la empresa EDELCA, encargada en principio de la explotación de la energía eléctrica del río Caroni en Venezuela, prevee la incorporación de tres nuevas centrales hidroeléctricas en la zona de Guayana. Paralelamente a esta inyección de MW al sistema está prevista la incorporación gradual de varios centros de carga asociados al procesamiento de aluminio y del hierro de esa zona.

La figura No 1 ilustra sobre la ubicación geográfica relativa de los referidos centros de generación y carga tras su completa incorporación para el año horizonte.

Se plantea entonces el diseño de un sistema de transmisión a nivel de tensión único que ofrezca las mayores ventajas técnicas y económicas para la interconexión de los centros de carga con los centros de generación.

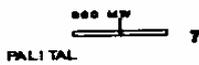
El diseño de esta red presenta características muy particulares. Estas se resumen a continuación:

- a) En su origen es un sistema casi totalmente desconectado.
- b) La previsión del crecimiento de la carga y de las fuentes de generación asociadas, plantean una estructura dinámica en la red de transmisión local.
- c) Las limitaciones geográficas en el área, introducen restricciones externas muy especiales no simulables en modelos comerciales.
- d) El mencionado dinamismo en el crecimiento de la red requiere de una herramienta de diseño totalmente interactiva: Modelo - planificador - computador.

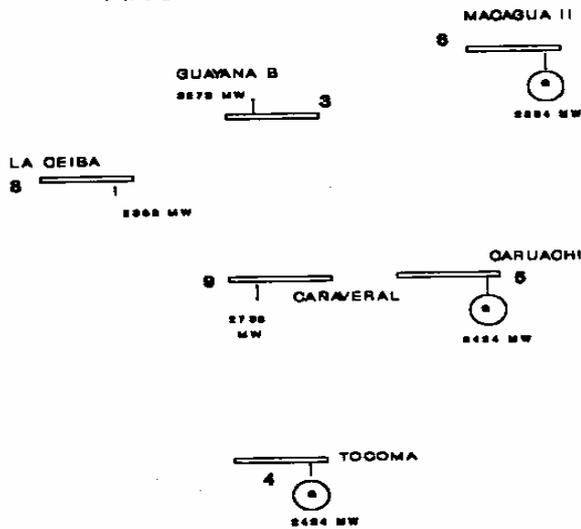
El modelo lineal se desarrolló tomando en cuenta todos estos atributos por lo que resultó una herramienta efectiva para agilizar la labor de planificación.

MODELO PARA LA EXPANSION

Para orientar el diseño de la red asociada al sistema, se planteó un modelo de



SISTEMA DE TRANSMISION AÑO HORIZONTE



GURI A (400 KV) GURI B (400KV)



Ubicación Relativa de Centros
de Carga y de Generación
Previstos para el Año Horizonte

FIGURA N° 1

diseño que procede de la siguiente forma:

a) Modelación de la red existente en forma lineal (Flujo de Carga D.C.).

b) Modelación de la red de alivio. Esta red imaginaria se modela como un problema de transporte donde sus enlaces no poseen límites de capacidad, pero sí poseen un costo por su uso. Estos costos corresponden a la inversión asociada a la construcción de la línea (proporcional a la longitud del enlace) y a los costos de los equipos terminales en las subestaciones.

c) Las dos redes se superponen y se

resuelven mediante programación lineal.

METODOLOGIA UTILIZADA

La metodología utilizada para la definición del sistema de transmisión, puede resumirse en cuatro pasos:

1) Establecimiento de una red conceptual mediante un modelo de optimización lineal desarrollado y adaptado a las características del sistema.

La definición del sistema conceptual se ejecutó en dos etapas:

MODELO PARA LA EXPANSION

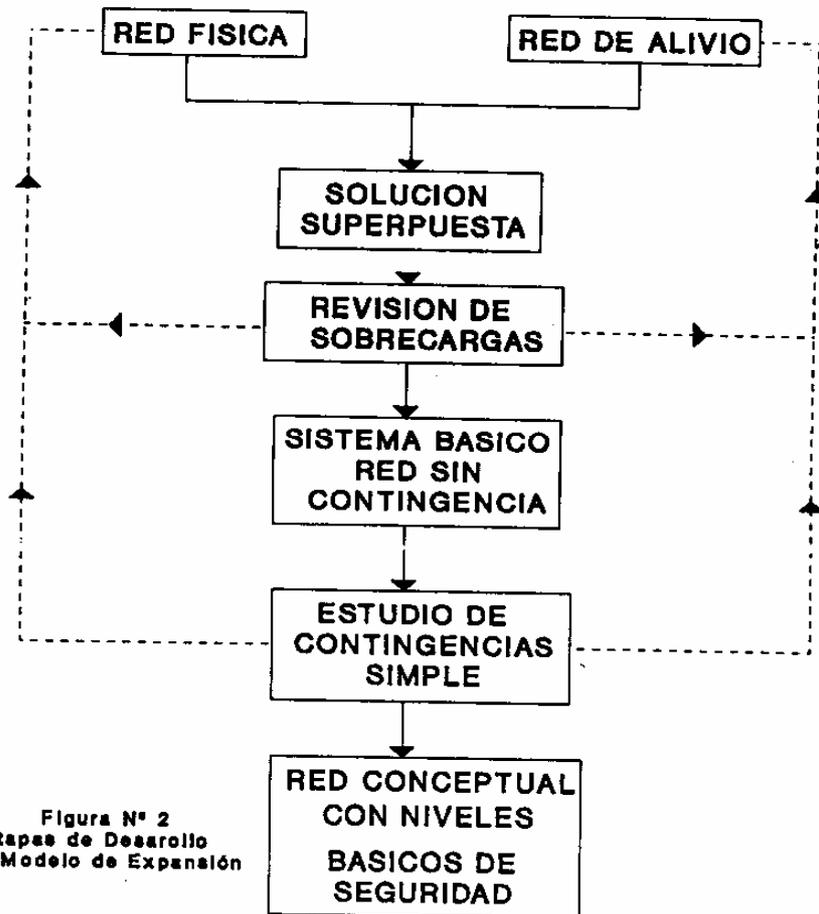


Figura N° 2
Etapas de Desarrollo
del Modelo de Expansión

programación matemática, con características lineales, capaz de minimizar una función objetivo, representativa de los costos asociados a la expansión de un sistema de transmisión, cumpliendo paralelamente con las restricciones de generación y flujo de potencia activa, las cuales definen la zona factible del modelo. La figura N° 2 ilustra las etapas de desarrollo del mismo.

El modelo desarrollado contempla el planteamiento de dos redes: una red física sin costo, cuya operación obedece a las leyes eléctricas básicas y una red de alivio modelada como un problema de

transporte de energía. El modelo procura en todo momento minimizar el uso de esta red (maximizar el uso de la red física) a fin de mantener bajos los costos de transmisión de potencia. En su etapa inicial se abren vías de alivio en todos aquellos corredores factibles de expansión, cuyos costos resumen los equivalentes a la construcción de una línea. El modelo resuelve para aquellos corredores más ventajosos económicamente orientando de esta manera, la aparición de nuevos refuerzos. La inserción de refuerzos se efectúa en forma gradual.

Se plantea entonces una herramienta de

-En primer lugar se obtuvo una red básica capaz de transportar la energía requerida en condiciones normales.

-Sobre la red básica obtenida se ejecutó un análisis de contingencia, utilizando el mismo modelo lineal, lo cual condujo al establecimiento de la red conceptual capaz de transportar la energía durante condiciones normales y de contingencias simples.

2) Verificación de la red conceptual mediante análisis de flujo de carga.

Una vez definida la red conceptual mediante las técnicas de programación lineal, se procede a estudiar el sistema mediante un flujo de carga en corriente alterna, para validar los resultados del flujo de potencia obtenidos por el modelo lineal y estudiar el comportamiento de las tensiones bajo condiciones de contingencia.

3) Verificación de la red mediante análisis de cortocircuito.

Igualmente se verifican los niveles de cortocircuito en las subestaciones existentes, con el objeto de orientar la red si fuera necesario, hacia la mejor estructura compatible con la capacidad de los interruptores.

4) Estructuración de un plan de expansión.

Una vez establecido el sistema de transmisión para el año horizonte, se procedió a elaborar el plan de expansión definiendo para cada año del periodo, las instalaciones requeridas.

REPRESENTACION MATEMATICA

En el modelo que se estudió para el sistema bajo consideración, la representación matemática de la red quedó limitada por ciertas características asociadas al sistema, los cuales son esencialmente aquellos de índole físico y económico que revisten mucha importancia cuando se desea expandir un sistema de transmisión a un costo mínimo, cumpliendo al mismo tiempo las condiciones de demanda de potencia eléctrica (MW) que se imponen a dicho sistema.

Modelo de la Red Existente.

El modelo de flujo de carga que se resuelve para la red existente, obedece a ambas leyes de Kirchoff:

- a) Conservación de flujo en cada barra.
- b) Conservación de voltaje en cada lazo.

y hace uso de la relación entre el balance de potencia activa del sistema y los ángulos de fase de los voltajes de barra, tal y como se procedería en un análisis de flujo de carga D.C. desacoplado rápido.

$$[DP] = [Pg] - [P1] = [Vt] [B] [s] \quad (1)$$

donde: [DP] Vector de potencia neta inyectada en los nodos.

[Pg]. Es el vector de generación nodal de potencia activa.

[P1]. Es el vector carga para todos los nodos.

[V] Es el vector de voltajes.

[B] Es la parte imaginaria de la matriz admitancia de barra.

[s] es el vector ángulo de fase

Si se asume el nivel de voltajes en 1.0 p.u., como es el caso para el flujo de carga D.C., la ecuación (1) se puede escribir:

$$[Pg] - [B] [s] = [P1]. \quad (2)$$

Esta relación se puede interpretar como el balance de potencia en los nodos, cumpliendo que las generaciones deben suministrar la demanda de cada uno de los nodos más la potencia que se transmiten por los nexos del sistema.

El flujo de potencia enviada por cualquiera de las líneas existentes no debe sobrepasar la capacidad límite de cada una de ellas.

El conjunto de ecuaciones definidas por esta restricción, pueden expresarse en forma matricial de la siguiente manera:

$$-[P_{max}] \leq [T] [s] \leq [P_{max}]. \quad (3)$$

$$[T] = [Q] [H] \quad (4)$$

donde:

[Q] Es una matriz de impedancia primitiva, cuyos elementos son las susceptancias de las líneas existentes.

[H] Es la matriz de incidencia nodal de la red existente.

[T] Se define como la matriz de incidencia de la susceptancias de transmisión.

Modelo de la Red de Alivio

La red de alivio de sobrecargas es una herramienta matemática capaz de orientar la selección de nuevas líneas de transmisión, pero si el sistema o red física esta totalmente diseñada, su utilización se torna inefectiva. La condición primordial de su uso es que la red existente este a punto de sobrecargarse.

Para la estructuración de esta red la zona se baña con corredores de alivio. Estos corredores de alivio no son mas que vías de expansión factible de la red que no poseen límites de capacidad pero si tienen altos costos representativos de los costos de construcción del refuerzo físico, mas el costo del equipo terminal requerido.

De esta red se conoce la matriz de conexión [k], la longitud de las vías de alivio y el costo de transmisión, los cuales tienen influencia sobre los resultados de la expansión ya que varían la ecuación de balance general de potencia, quedando esta con la siguiente estructura:

SISTEMA DE TRANSMISION AÑO HORIZONTE

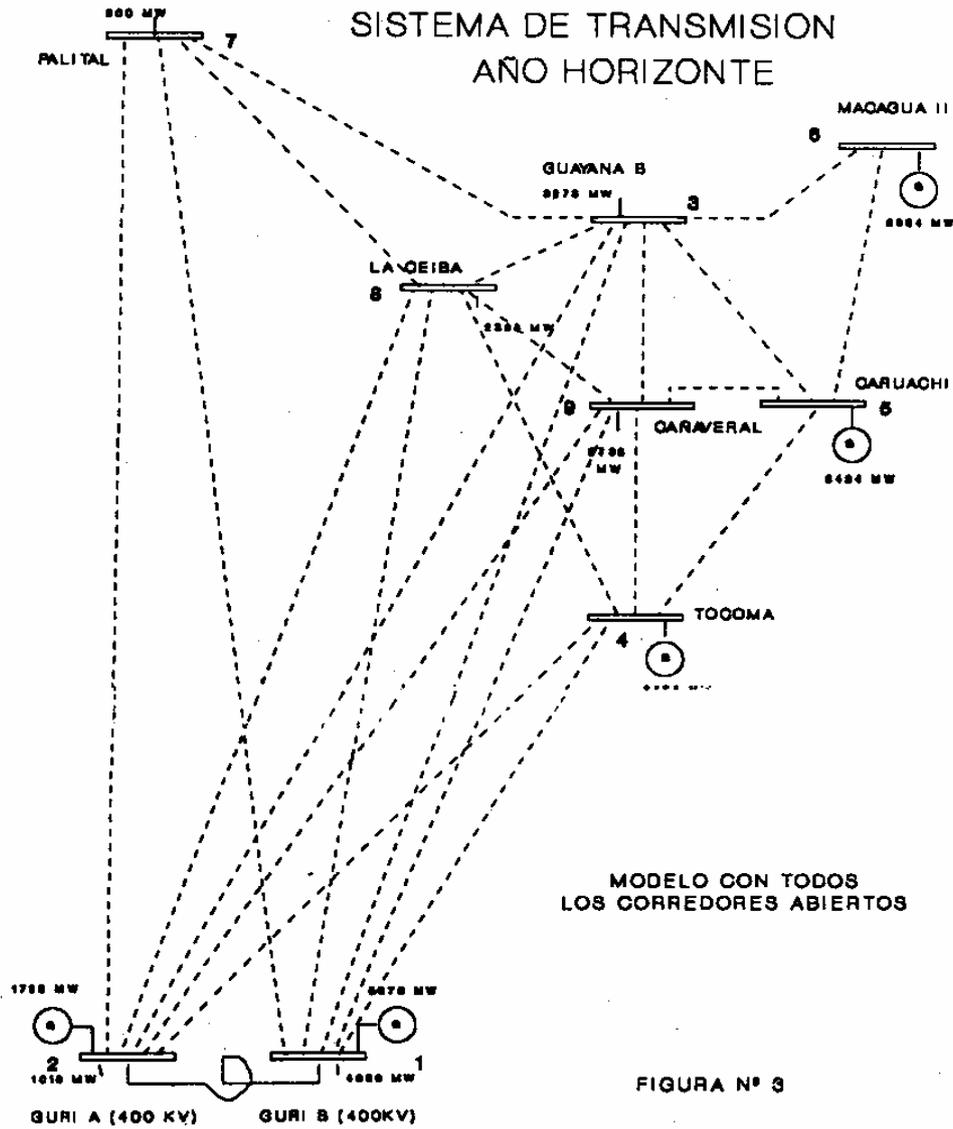


FIGURA N° 3

$$[Pq] - [B][s] + [Kt][PD] - [Kt][PD'] = [P] \quad (5)$$

donde:

[Kt]. Es la transpuesta de la matriz conexión.

[PD]. Es la potencia que fluye a través de las vías de sobrecargas en una dirección de flujo.

[PD']. Es la potencia que fluye en dirección contraria.

En la figura Ng 3 se muestran los

corredores factibles de expansión para la red que se diseña.

FORMULACION DEL MODELO

En el presente modelo, la inversión en la construcción de nuevas líneas constituye la función que deseamos minimizar.

$$\text{Minimizar } \rightarrow Z = [C]t [P_D] + [C]t [PD'] \quad (6)$$

donde:

[C]t. Es la transpuesta del vector costo equivalente del flujo a través de la red de alivio.

[PD]. Es el flujo de potencia a través de la línea de sobrecarga en un sentido definido.

[PD1]. Es el flujo de potencia en dirección contraria.

La formulación compactada del problema es la siguiente:

$$\begin{array}{cccccccc}
 [s] & [PG] & [PD] & [PD1] & -I & [W1] & [W2] & [W3], \text{ RHS} \\
 \hline
 1 & 0 & 0 & [C] & [C] & 1 & 0 & 0 & 0 = 0 \\
 2 & -[D] & [I] & [K] & -[K] & 0 & 0 & 0 & 0 = P1 \\
 3 & [T] & 0 & 0 & 0 & 0 & [I] & 0 & 0 = [P]_{\text{max}} \\
 4 & -[T] & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & [I] & 0 = [P]_{\text{max}} \\
 5 & 0 & [I] & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & [I] = [PG]_{\text{max}}
 \end{array}$$

En esta formulación, los vectores [W1], [W2], y [W3], son vectores de variables artificiales y representan lo siguiente:

[W1]. Capacidad de transmisión remanente en una dirección específica en la red original.

[W2]. Capacidad de transmisión remanente en dirección contraria a la especificada por la red original.

[W3]. Capacidad de generación remanente en el sistema.

CARACTERISTICAS DE LOS CORREDORES

Las características de los corredores disponibles son de gran importancia, ya que de ellos depende la solución del modelo. Los datos primordiales son la longitud, puntos de incidencia, costos de construcción y capacidad de transporte de los circuitos físicos incorporables.

La tabla N° 1, muestra un resumen de las características de los corredores factibles para la expansión de la transmisión.

Es conveniente resaltar que los costos totales asignados a cada corredor, pueden no corresponderse con costos actualizados, sin embargo esta no es una condición importante al modelo. Importantes son los costos relativos.

Para definir la capacidad de transmisión por circuito factible de inserción en los respectivos corredores, que aparece listada en la tabla N° 1, se tomó como criterio que cada línea puede transmitir una potencia máxima de forma tal que la caída de tensión entre sus terminales no supere el 10%. Para el cálculo de la caída de tensión se adoptó un factor de potencia de 0.8, lo cual constituye una condición pesimista.

La tabla N° 2, resume la carga y la generación por barra para el año horizonte.

TABLA N° 1
RESUMEN DE CORREDORES
SISTEMA DE TRANSMISION ASOCIADO AL BAJO CARONI
AÑO HORIZONTE

CORREDORES	LONGITUD (Km)	CAPACIDAD/CTT (MW)	REACTANCIA (p.u./km)	COSTOS \$/M Ps
GURI B-PALITAL	77	975	1.61E-02	184.34
GURI A-PALITAL	77	975	1.61E-02	184.34
GURI B-LA CEIBA	67	1121	1.40E-02	172.89
GURI A-LA CEIBA	67	1121	1.40E-02	172.89
GURI B-GUAYANA B	68	1104	1.42E-02	174.04
GURI A-GUAYANA B	68	1104	1.42E-02	174.04
GURI B-TOCONA	25	2450	5.21E-03	124.08
GURI A-TOCONA	25	2450	5.21E-03	124.08
GURI B-CARUACHI	75	1001	1.56E-02	182.05
GURI A-CARUACHI	75	1001	1.56E-02	182.05
GURI B-CAGAVERAL	62	1211	1.29E-02	167.16
GURI A-CAGAVERAL	62	1211	1.29E-02	167.16
TOCONA-LA CEIBA	50	1502	1.64E-02	153.43
TOCONA-GUAYANA B	55	1365	1.15E-02	159.15
TOCONA-CARUACHI	45	1669	9.30E-03	147.70
TOCONA-CAGAVERAL	45	1669	9.30E-03	147.70
CARUACHI-CAGAVERAL	7	2450	1.46E-03	104.19
CARUACHI-LA CEIBA	20	2450	4.17E-03	119.00
CARUACHI-GUAYANA B	15	2450	3.13E-03	113.35
CARUACHI-MACAGUA	30	2450	6.26E-03	130.52
MACAGUA-CAGAVERAL	28	2450	5.84E-03	128.24
MACAGUA-GUAYANA B	23	2450	4.80E-03	122.51
MACAGUA-LA CEIBA	28	2450	5.84E-03	128.24
CAGAVERAL-PALITAL	15	2450	3.13E-03	113.35
CAGAVERAL-LA CEIBA	5	2450	1.04E-03	101.90
CAGAVERAL-GUAYANA B	5	2450	1.04E-03	101.90
GUAYANA B-LA CEIBA	5	2450	1.04E-03	101.90
GUAYANA B-PALITAL	30	2450	6.26E-03	130.52
LA CEIBA-PALITAL	10	2450	2.09E-03	107.63

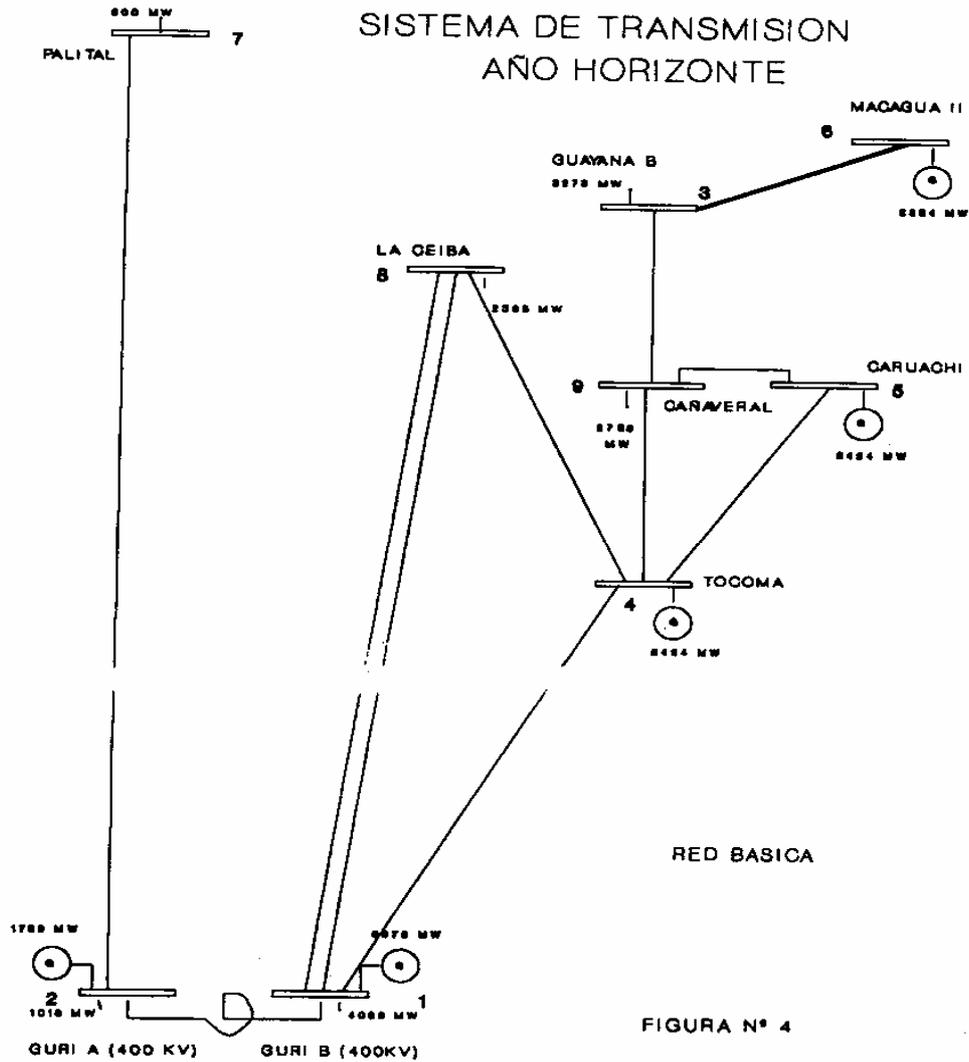
TABLA N° 2

RESUMEN DE CARGAS Y GENERACION POR BARRAS
SISTEMA REGIONAL GUAYANA
AÑO HORIZONTE

N°	BARRAS	CARGA (MW)	GENERACION (MW)
1	GURI B	4066	5670
2	GURI A	1016	1789
3	GUAYANA B	3273	0
4	TOCONA	0	2251
5	CARUACHI	0	2251
6	MACAGUA	80	2275
7	PALITAL	600	0
8	LA CEIBA	2368	0
9	CAGAVERAL	2736	0

CRITERIO DE SEGURIDAD

Se adoptó como criterio de seguridad, para el diseño de la red de transmisión el de contingencia simple. En otras palabras, el sistema debe ser capaz de soportar una falla en uno de los corredores, sin tener necesidad de racionar carga. Este criterio es de uso generalizado en la planificación de sistemas de transmisión.



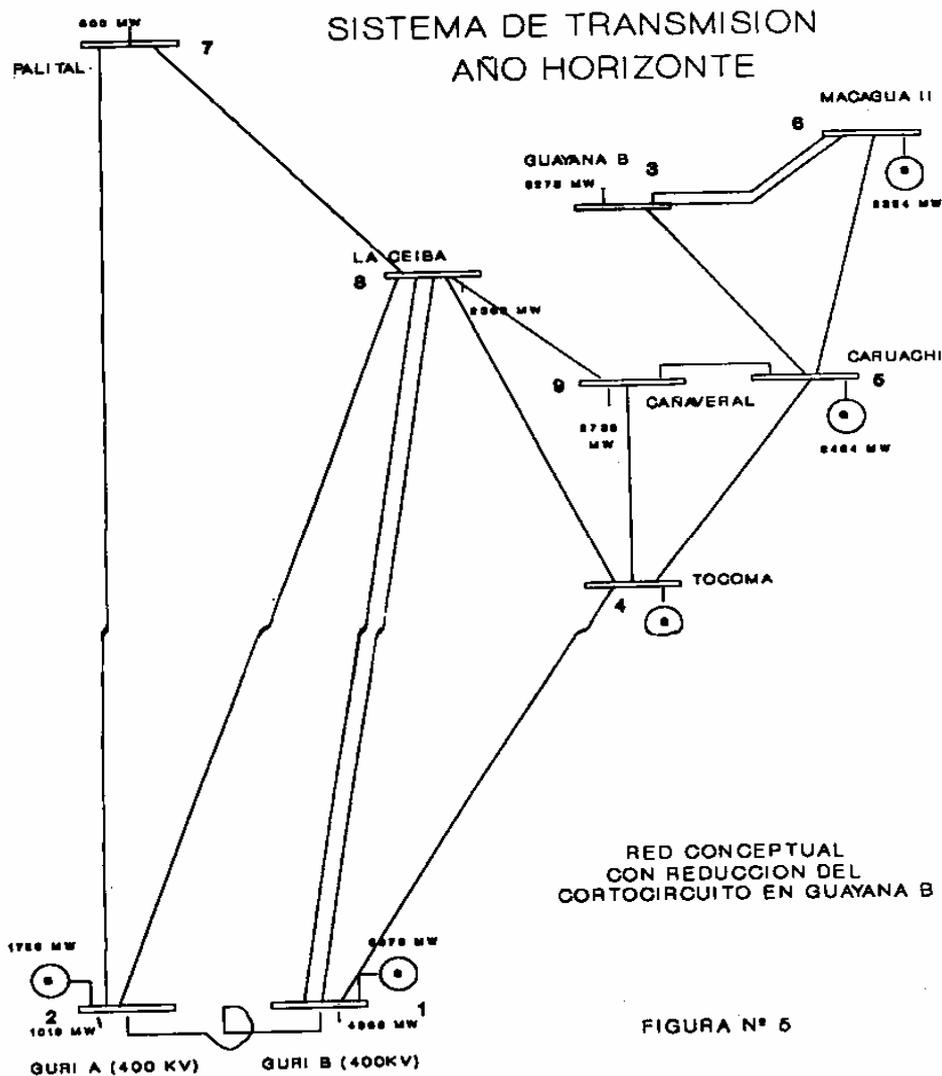
RESULTADOS OBTENIDOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los diversos análisis realizados para la definición del diseño óptimo para el largo plazo de la red de transmisión para el sistema bajo estudio.

Definición de la Red Básica

Tal como se mencionó antes, la primera fase del estudio consiste en establecer para el año horizonte una red básica de transmisión, mediante la aplicación sistemática del modelo lineal incorporando las restricciones por cruces de líneas.

En la figura N° 4 se muestra la red básica resultante. Para obtener esta red se efectuaron diversas iteraciones del modelo, sobre el sistema de alivio presentado en la figura N° 3, reforzando los corredores sobrecargados de acuerdo a la conveniencia económica señalada por la minimización de la función objetivo definida y vigilando la posibilidad de soluciones que implicarán cruces de líneas en el sistema. Al final de este proceso se encontró una primera definición (red básica) del sistema de transmisión que satisface la transmisión de potencia en el sistema bajo condiciones normales de operación (sin contingencia).



Definición de la Red Conceptual

Posterior al estudio para el diseño de la red básica, se continuó el análisis con miras a encontrar la red conceptual que orientará el esquema de refuerzos del sistema a fin de adecuarlo a condiciones de contingencia simple. En tal sentido se simularon fallas en cada una de las líneas, encontrándose la solución más económica para cada caso. El resultado de este análisis se muestra en la figura N° 5. Puede observarse que se incorporaron los siguientes refuerzos en relación al caso base:

- Una línea entre Cañaveral y La Ceiba
- Una línea entre Caruachi y Guayana B
- Una segunda línea entre Macagua II y Guayana B
- Una línea entre La Ceiba y Palital
- Una línea entre Guri A y La Ceiba.

Estudios Técnicos sobre la Red Conceptual

Análisis de flujo de carga y cortocircuito.

Sobre el sistema conceptual, se efectuaron análisis de flujo de carga y cortocircuito con tres objetivos principales:

- Verificar los flujos de potencia por las

líneas. (constraste con la solución del flujo de carga DC. del modelo lineal).

- Verificar el comportamiento de las tensiones en barras.
- Verificar los niveles de cortocircuito en las subestaciones.

Flujo de carga

En relación al flujo de carga se consideró lo siguiente:

- Se tomó la barra Guri B, como barra de referencia.
- Se utilizó como factor de potencia de la carga un valor promedio de 0.9.
- Se tomó en cuenta la posibilidad de ajustar los taps de los transformadores en niveles de menor tensión.

De estos estudios de flujo de carga se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1.- Los flujos de potencia activa por las líneas coinciden con los calculados mediante la aproximación lineal del modelo D.C., lo cual valida la herramienta utilizada.

2.- Del análisis del perfil de tensiones se observó lo siguientes:

a) Las tensiones en las barras Guayana B, Cañaverál y La Ceiba, resultaron muy bajas por lo que fue necesario incorporar compensación reactiva en el siguiente orden:

LÍMITES DE COMPENSACION DE REACTIVOS MVA		
BARRA	MÍNIMO	MÁXIMO
Guayana B	-300	510
Cañaverál	-200	300
La Ceiba	-200	500

b) Los límites de transmisión adoptados para cada línea en el modelo lineal, basados en restricciones de caídas de tensión, resultaron conservadores al analizar la red con flujo de carga a.c., incluyendo compensación de reactivos. Este hecho condujo a la revisión de los refuerzos de la red conceptual detectándose la factibilidad de eliminar uno de los enlaces Guri-La Ceiba, manteniendo las mismas condiciones de seguridad del sistema. A tal efecto se eliminó la línea entre las estaciones Guri A - La Ceiba en virtud de las limitaciones para salida de líneas que tiene la primera.

Estudios de cortocircuito

Para el estudio de cortocircuito se adoptaron los siguientes criterios:

- Los generadores operan en su condición normal.
- Los cambiadores de toma de los

transformadores se encuentran en su posición nominal.

- Se consideran cargas en las barra.

La solución final considerando los ajuste en los niveles de cortocircuito del sistema esta mostrada en la figura No 6.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

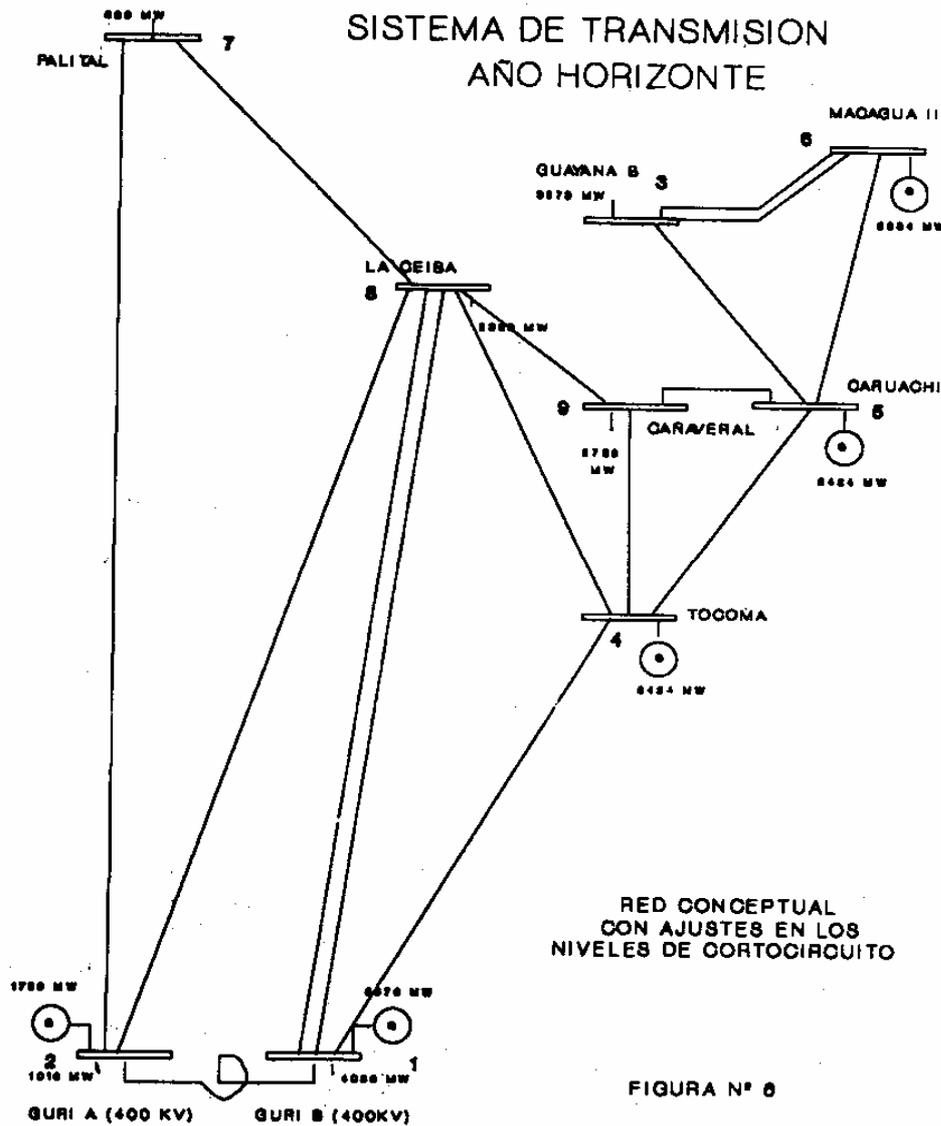
En este artículo se recogen los aspectos básicos relacionados con la estructuración y aplicación de la herramienta de planificación para el diseño de un sistema de transmisión (económico y confiable), para el largo plazo, capaz de conectar la potencia y energía generadas en las nuevas plantas hidroeléctricas que se tienen prevista para la región de Guayana de Venezuela, y transportarla a los centros de carga que evolucionaran en el área.

Las características particulares del sistema bajo estudio como son por ejemplo: sistema totalmente segregado, imposibilidad geográfica para permitir cruce de línea, etc..., fueron determinantes en el desarrollo y uso de esta herramienta, la cual a su vez ofrece otras ventajas prominentes en comparación con herramientas convencionales de diseño:

- Es totalmente interactiva.
- Facilmente adaptable para su ejecución en microcomputadores modernos.
- Facilmente automatizable.
- No requiere de la definición de nexos desechables, a fin de hacer la red conexa en su origen.
- Resuelve el flujo de carga sistemático, mediante superposición.
- Permite el diseño de redes de transmisión, independientemente del grado de desconexión que esta posea.

La aplicación de la herramienta estructurada, al diseño de la red para el largo plazo, define sólo un sistema referencial para un año horizonte, el cual sirve de guía para orientar la evolución del sistema de transmisión a través de los años.

Debido a la alta dispersidad que presenta el modelo matemático de la herramienta, la aplicación de técnicas de compactación matricial ofrece grandes posibilidades de mejoras en cuanto al tiempo de ejecución en el microcomputador.



REFERENCIAS

[1] Ramon Villasana, L. L. Garver y S. J. Salon. "Transmission Network Planning Using Linear Programming", IEEE/PES, 1984.

CURRICULA

Ramon Villasana, PhD:
Ingeniero Electricista, 1971, Universidad de Oriente, Venezuela. Maestria en Ciencias, 1973, Universidad de Manchester (UMIST), Inglaterra. PhD, 1984, Rensselaer Polytecnic Institute (R.P.I.), Estados Unidos. Actualmente Profesor de Sistemas de Potencia en el departamento de Conversion

de Energia y Transporte de la Universidad Simon Bolivar, Caracas.

Mauricio Orellana, Ing.:
Ingeniero Electricista, 1987, Universidad Central de Venezuela. Actualmente desempeña el cargo de Ingeniero Proyectista en ASINCRO C.A..

Juan Carlos Ledezma, Ing., Msc.:
Ingeniero Electricista, 1979, Universidad Simon Bolivar. Master de Ingenieria en Sistemas Electricos de Potencia, Rensselaer Polytecnic Institute (R.P.I.), 1980. Actualmente desempeña el cargo de Gerente de Estudios de la empresa consultora ASINCRO C.A., Caracas.

Fidel Perez, Ing.:
Ingeniero Electricista, 1984, Universidad
Simon Bolivar. Actualmente realiza estudios
de Maestria en Procesos en la Universidad
Central de Venezuela. Se desempeña como
jefe de seccion de expansion de transmision
de la division de Planificación de Sistemas
Eléctricos de EDELCA.