

Introducción a los Sistemas de Transmisión

Generalidades

La electricidad es una de las manifestaciones más contundentes y hermosa de la energía dentro de la naturaleza, y que en sí esta reviste una mayúscula importancia, para el hombre y en la evolución de la civilización moderna. De tal modo el consumo de energía eléctrica es uno de los indicadores del desarrollo de las sociedades modernas junto con el grado de cobertura del servicio. El progreso económico de un país en vías de desarrollo, como Venezuela, marcha a la par de su capacidad para llevar la energía eléctrica a los puntos más remotos del territorio Nacional.

El suministrar energía eléctrica a un país requiere de un proceso complejo, cuya tarea es efectuada por las empresas del sector eléctrico; siendo el sector eléctrico en sí una estructura extensa, complicada, de singular importancia y con un alto nivel estratégico. La tarea de hacer llegar a todos los hogares y organizaciones un servicio de electricidad de *alta calidad, confiable* y de *bajo costo* se convierte en un reto para todas las compañías que conforman el sector eléctrico. Sin embargo, éste proceso es de complejidad creciente, en donde todas las situaciones estructurales y operativas ameritan estudios delicados, de manera que no se afecte los costos y la calidad del servicio; y es entonces donde surge la necesidad, e importancia de estudiar los grandes sistemas eléctricos. En particular, los *sistemas de transmisión de energía* es el subsistema de mayor extensión (aunque de menor costo) dentro del sector eléctrico.

En el presente capítulo se una breve introducción a los sistemas de potencia, con el objetivo de establecer la ubicación del sistema de transmisión de energía dentro de la compleja estructura del sistema de potencia; enunciando los conceptos más básicos sobre a estructura y operación de los sistemas de potencia.

Preámbulo: Necesidad de la Normalización

Los profesionales del sector eléctrico emplean en muchas ocasiones los estándares, prácticas recomendadas, y guías extensivamente en el diseño, instalación, operación, y mantenimiento de sistemas eléctricos. Los estándares establecen requerimientos específicos tales como definiciones de términos eléctricos, métodos de medición y procedimientos de pruebas y dimensionamiento y características de equipos. Las prácticas recomendadas, sugieren los mejores métodos de lograr un objetivo para unas condiciones especificadas. Las guías especifican los factores que deben ser considerados en el cumplimiento de un objetivo determinado. Todos son agrupados como documentos cada uno de ellos con su respectiva validez y ámbito de aplicación. Se ha de tener mucho cuidado sobre la aplicabilidad de estándares, en particular por su ámbito, contexto y aplicabilidad, pero además sobre la vigencia del mismo.

En el caso particular de Venezuela, COVENIN, Comisión Venezolana de Normas Industriales en su Norma COVENIN 391, ha establecido las normas modernas que rigen la normalización de los sistemas eléctricos. Además CODELECTRA, Comité de Electricidad, quien junto a COVENIN son los organismos encargados de erigir normativas de seguridad en aspectos de sistemas eléctricos. En general, COVENIN adoptó muchos otras normas de un ámbito de aplicabilidad más extenso.

Las normativas como se ha evidenciado, depende del contexto, ámbito y poseen una vigencia, de tal modo que en el sector eléctrico se suelen distinguir por normativas internacionales, nacionales, regionales y especiales. En la Tabla 1, se muestra un resumen de algunas normativas aplicables al sector eléctrico en función a su contexto.

Tabla 1. Diferentes Estándares a Nivel Regional y Mundial

<i>Siglas</i>	<i>Significado</i>	<i>País</i>
<i>Estándares Europeos</i>		
CENELEC	European Committee for Electrotechnical	Comunidad Económica Europea
BS	British Standard	Reino Unido
DIN	Deutscher Institut für Normung	Alemania
IEE	Institute of Electrical Engineers	Reino Unido
CEI	Comitato Elettrotecnico Italiano	Italia
VDE	Verband Deutscher Elektrotechniker	Alemania
<i>Estándares Americanos</i>		
ANSI	American National Standard Institute	EE.UU.
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineer	EE.UU.
ISA	Instrument Society of America	EE.UU.
UL	Underwriters Laboratories	EE.UU.
<i>Estándares Mundiales</i>		
IEC	International Electrotechnical Institute	

La *American National Standard Institute* (ANSI), no escribe estándares, sino que éste instituto promueve y coordina el desarrollo de la estandarización en nacional americana y aprueba aquellos documentos que han sido preparados de acuerdo con las regulaciones ANSI.

El *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) publica algunos cientos de documentos y estándares cubriendo varios campos de la ingeniería eléctrica. Los estándares de la IEEE son rutinariamente enviados a la ANSI; para su consideración, y posterior aprobación; para que sean considerados como estándares nacionales americanos.

El *Underwriters Laboratories, Inc* (UL) prepara estándares para equipos eléctricos incluyendo su aplicación y prueba para cumplir con esos estándares. Los fabricantes que poseen sus productos aprobados por los comités de la UL son autorizados para emplear la etiqueta UL en sus equipos.

La *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), prepara estándares que establecen las dimensiones, rating, y requerimientos de rendimiento para equipos eléctricos. Sus estándares son ampliamente usados en la preparación de especificaciones de adquisición.

La *National Fire Protection Association* (NFPA), establecen estándares y documentos que especifican los requerimientos de protección al fuego y a la seguridad; en particular la NFPA, edita el ANSI/NFPA 70-1999, *National Electric Code*, que es una herramienta de criterios de seguridad en instalaciones eléctrica.

Definición de Sistema de Potencia

Establecer una definición única de sistema de potencia, es algo difícil, ya que existe gran cantidad de autores que han establecido sus puntos de vista al respecto de esto, por ello, para ser objetivo se presentan los conceptos internacionalmente aceptados por instituciones de importancia.

Una de las definiciones más aceptadas a escala mundial, es la establecida por el *Institute of Electrical and Electronics Engineer* (IEEE -Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos), este define un sistema de Potencia como: *una red formada por unidades generadoras eléctricas, cargas y/o líneas de transmisión de potencia, incluyendo el equipo asociado, conectado eléctricamente o mecánicamente a la red*¹. Por otra parte el diccionario de términos eléctricos y electrónicos de la IEEE, define el sistema de potencia como *las fuentes de potencia eléctrica, conductores y equipos requerido para suplir la potencia eléctrica*² [2].

Sobre la base de las definiciones antes expuestas, este autor, define un sistema de potencia, como:

¹ IEEE, Power System Engineering Committee (1992). *Transactions on Power Apparatus and System*, July de 1992, pp. 1894-1898.

² IEEE Standard Dictionary of Electrical & Electronic Terms, ANSI-IEEE Standard 100-1984.

Red eléctrica de potencia que se encarga de generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica, hasta los consumidores.

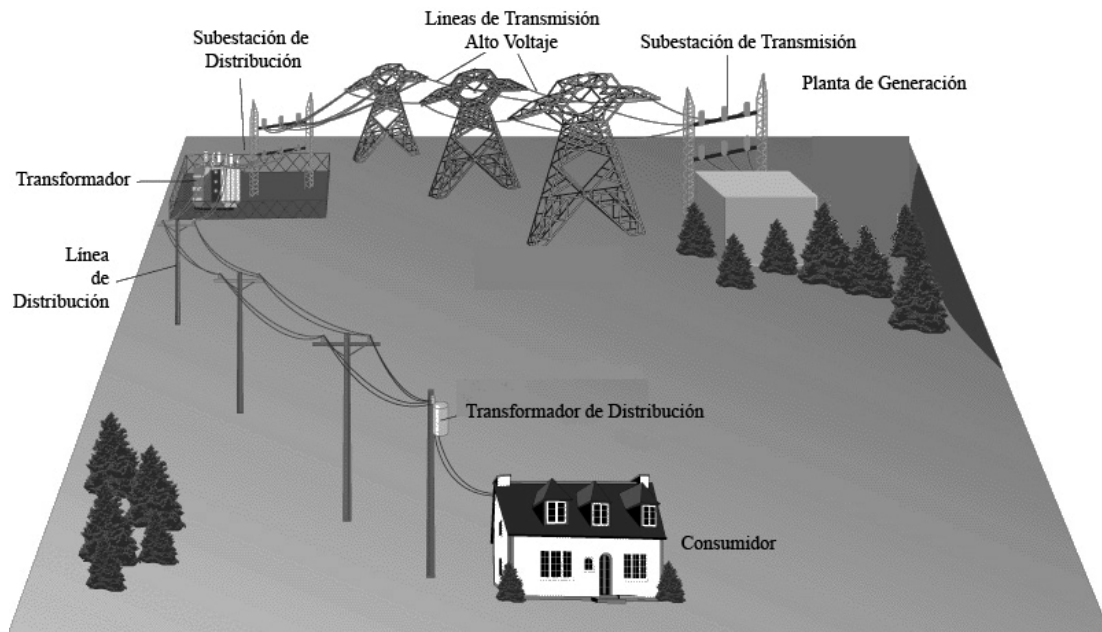


Figura 1. Vista general de una Representación simple de la Estructura de un Sistema de Potencia Típico

Ha de entenderse, entonces, un sistema eléctrico de potencia, como el conjunto de elementos que constituyen la red eléctrica de potencia siendo su función; generar, transmitir y distribuir, la energía eléctrica hasta los usuarios, bajo ciertas condiciones y requerimientos.

Las tareas de un sistema de potencia son realizadas por cada una de las mayores empresas que prestan el servicio de electricidad (*Electric-Utility*). A nivel mundial las empresas de suministro de electricidad son tanto de capital público como privado. En países como EE.UU. Reino Unido, Argentina, Perú entre otros, las empresas con capital privado son las que se encargan de prestar el servicio eléctrico en su totalidad. En el caso particular de Venezuela, el servicio suministro de energía eléctrica efectuado por empresas de naturaleza pública y privada.

El *Sistema Eléctrico Nacional* (SEN) lo conforman 18 empresas eléctricas públicas y privadas, todas agrupadas en una organización denominada la *Cámara Venezolana de la Industria Eléctrica* (CAVEINEL) [3]. CAVEINEL tiene por objetivo ejercer la representación institucional de sus afiliados y velar por los intereses generales de la industria eléctrica y su personal, en armonía con los intereses de la colectividad. Las empresas públicas son CADAPE con cinco empresas filiales (Eleoriente, Elecentro, Eleoccidente, CADELA y SEMDA), EDELCA, ENELVEN, ENELCO y ENELBAR. Las empresas privadas son la Electricidad de Caracas con sus empresas filiales (CALEV, ELEGUA y CALEY), ELEBOL, CALIFE, ELEVAl y SENECA.

Los sistemas de potencia son estructuras complejas y extensas, y debido a múltiples factores (estratégicos, económicos, etc.) no operan de manera aislada, sino que por el contrario, se encuentran relacionados entre sí, constituyendo lo que se denomina un *Sistema Interconectado* (*Power-Pool*). Un sistema interconectado son dos o más sistemas de potencia que se encuentran conectados eléctricamente entre sí, los cuales son planificados y operados de manera poder suministrar la energía de manera más confiable y económica a sus cargas y consumidores, combinando, con los planes de expansión, mejora y mantenimiento de cada sistema, con el objetivo de lograr crecer a la par de la carga.

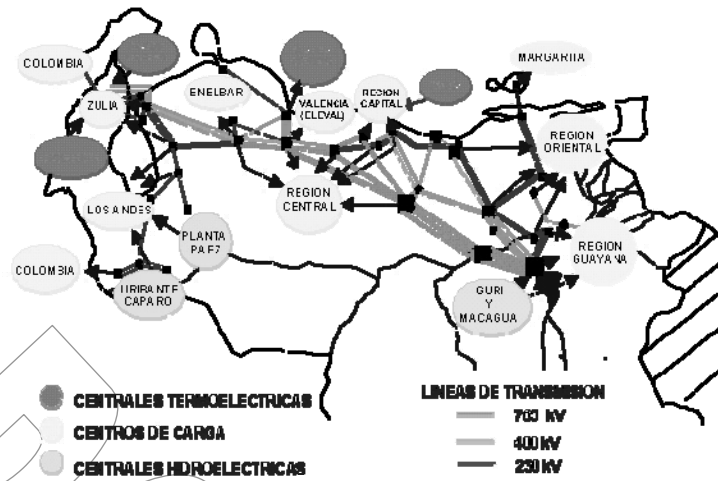


Figura 2. Estructura General del Sistema Interconectado Nacional

Las interconexiones facilitan la coordinación de las actividades de planificación y operación de los sistemas de generación y transmisión de los sistemas de potencia; integrándolos a los efectos de expandir y operar el sistema Interconectado, y así satisfacer la demanda de energía eléctrica, asegurando la calidad y confiabilidad del servicio al menor costo posible, mediante la optimización en el uso de las instalaciones y de los recursos energéticos.

Ahora bien, en atención a la definición sencilla, resulta evidente que el sistema de potencia posea tres partes principales: las centrales de generación, las líneas de transmisión y las redes de distribución; la representación de un sistema de potencia puede ser esquematizado de la siguiente Figura.

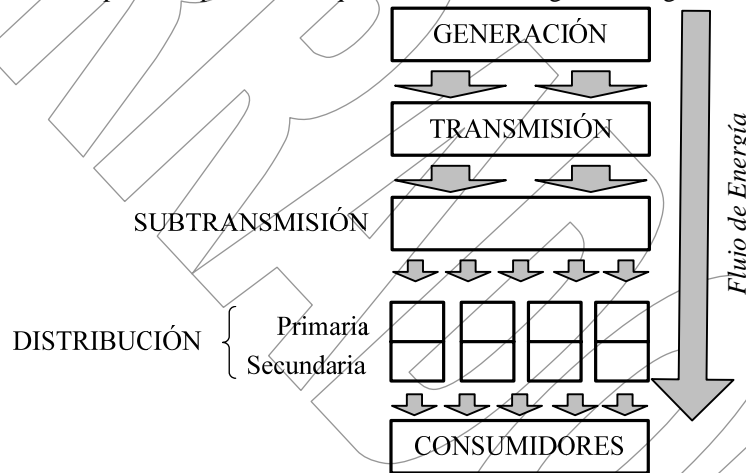


Figura 3. Estructura General de un Sistema de Potencia

Las interconexiones en los sistemas de potencia se llevan a cabo en el nivel de transmisión (*Tie-Line*), esto encuentra su justificación en la posibilidad de poder intercambiar fácilmente grandes bloques energéticos.

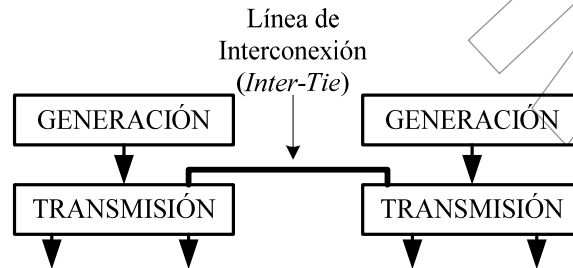


Figura 4. Estructura General de un Sistema de Potencia Interconectado

Dentro de los sistemas de potencia debido a su estructura, es común distinguir cuatro niveles funcionales u operativos de tensión: generación, transmisión, sub-transmisión y distribución. El sistema de potencia esta constituido por muchos elementos cada uno de ellos cumple con funciones específicas, de manera que en operación conjunta garanticen un flujo *confiable* y *económico* de electricidad.

Sistema de Generación

El sistema de generación es la parte básica del sistema de potencia, esta se encarga de entregar la energía eléctrica al sistema, esto a partir de la transformación de distintos tipos de energía primaria. El conjunto de unidades generadoras reciben el nombre de *centrales o plantas de generación*, siendo su tarea tomar una fuente primaria de energía y convertirla en energía eléctrica. El tipo de central de generación y su ubicación depende de las condiciones físicas de la fuente primaria de utilización. La selección del tipo de central de generación eléctrica se realiza por criterios técnicos y económicos, siendo estos últimos lo de mayor importancia. Una *central eléctrica* consta de las máquinas motrices, generadores, aparatos de maniobra y protección, etc. que sirven para la producción de energía eléctrica. En la realidad, el nombre de central eléctrica es la abreviación de *Central Generadora de Energía Eléctrica*.

Las *centrales de generación*, son instalaciones encargadas de entregar energía al sistema, a partir de transformar alguna fuente de energía primaria (Hidráulica, Térmica, Nuclear, Eólica, Geotérmica, etc.) en energía eléctrica. Existen muchas y muy variadas formas de generar energía eléctrica, pero de acuerdo a su forma primaria de energía se pueden distinguir los siguientes tipos: Térmica, Hidráulica, Nuclear, Solar, Eólica, Geotérmica, Magneto-Hidrodinámica, Maremotrices.

Sistema de Transmisión

Las *líneas de transmisión* constituyen los eslabones de conexión entre las centrales generadoras y las redes de distribución y conduce a otras redes de potencia por medio de interconexiones. La misión del sistema de transmisión es transportar grandes bloques de energía desde los centros de generación a los puntos del sistema, interconectar las diferentes centrales y/o diferentes sistemas de potencia.

Las líneas de transmisión son los elementos físicamente más extensos del sistema de potencia y poseen un gran número de ventajas:

- Permite producir la energía eléctrica en forma más económica.
- Se logra disminuir la capacidad de reserva y reserva rodante.
- Permiten mejorar la contabilidad del sistema de potencia.

Capacidad de reserva: Es el número de máquinas necesarias para atender la *carga punta*.

Reserva Rodante: (Spining reserve) se refiere al número de máquinas en vacío, necesarias para atender cambios bruscos de carga.

Las líneas de transmisión operan a niveles de voltaje elevados, esencialmente se debe al hecho que al duplicar la tensión de operación se cuadruplica la potencia que se puede transmitir. Por ejemplo si se quisiera transmitir una potencia de 2000 MWatt a una distancia de 400 Km. se necesitarían aproximadamente 45 líneas de 115 kV, 15 líneas de 230 kV, 4 líneas de 380 kV, 2 líneas de 500 kV, o una líneas de 700 kV, se debe recordar que el número de líneas no es el único factor a estudiar para transportar energía eléctrica.

En Venezuela, los grandes recursos hidráulicos se ubican en la región de Guayana, mientras que las centrales térmicas se encuentran en la zona central, de manera que para unir todas estas fuentes de generación con los distribuidos centros de consumos, se emplean las redes de transmisión de potencia eléctrica. Las áreas (compañías eléctricas) que conforman el *Sistema Interconectado Nacional (S.I.N)* se encuentran unidas a través de un Sistema de Transmisión que alcanza los niveles de tensión de 230, 400 y 765 kV. Cada uno de estos sistemas recibe el nombre de *Red Troncal de Transmisión*, presentando longitudes apreciables como el enlace Guayana - Centro que posee aproximadamente 650 Km.

Tabla 2. Longitud de las Líneas de Transmisión y la Red Troncal de Transmisión por nivel de Voltaje en Venezuela (2005)

Nivel de Voltaje (kV)	Longitud R.T.T. (Km.)	Totales (Km.)
115	306	10.401
230	3.940	5.606
400	3.906	4.190
765	2.083	2.803

El sistema de de 400 y 765 kV son considerados dentro de los sistemas de Extra Alta Tensión (EAT o EHV: *Extra High Voltaje*) y son de relativamente reciente implantación en el país 1968 y 1986 respectivamente.

Sistema de Distribución

La energía eléctrica es transmitida frecuentemente en bloques de magnitud considerable y en altas tensiones desde el punto de generación hasta el área donde se pretende distribuirla, de ahí que sea necesario ejecutar uno o más pasos de transformación para llevarla a los niveles de utilización. El sistema de distribución es el último sub-sistema dentro de los sistemas de potencia antes de llegar a los consumidores. Esta parte del sistema de potencia esta compuesto de líneas y dispositivos para distribuir la energía eléctrica hasta los usuarios. Estos pasos de transformación dan lugar a las diferentes etapas del sistema de distribución. Dentro del sistema de distribución se distinguen dos grandes niveles bien diferenciados:

- *Sistema de Distribución Primaria.*
- *Sistema de Distribución Secundario.*

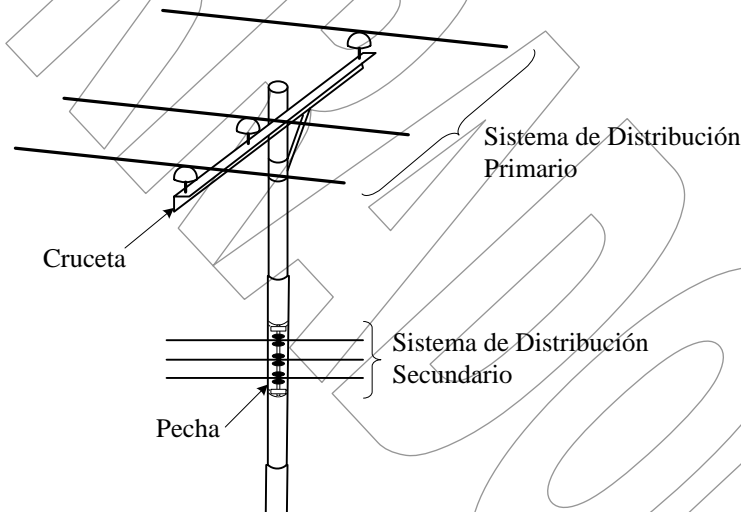


Figura 5. Estructura Física de un Sistema de Distribución Aéreo Típico

Las redes de distribución constan de líneas de distribución y dispositivos necesarios para distribuir la energía eléctrica hasta los consumidores, dentro de este sistema se distinguen dos grandes niveles bien diferenciados.

Distribución Primaria: que trabaja con niveles de tensión y potencia moderados. En Venezuela los niveles de tensión suelen ser: 24 kV (Electricidad de Caracas ELECAR) 13.8 kV (Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico, CADAFE y sus comercializadoras) 6.9 kV (ELECAR y empresas petroleras) y 4.16 kV (empresas del sector petrolero). En este nivel pueden ser alimentados consumidores especiales como industrias y otros. Los circuitos de distribución primario se caracterizan porque están conectados a un solo punto o subestación de distribución, (*Sistemas Radiales*) y es muy poco visto solo en casos especiales la conexión a más de una subestación (*Sistema de Anillo Múltiple*). Los niveles de potencia

manejados en este sistema son modestos, así por ejemplo: para 13.8 kV. La capacidad de transporte no supera los 5 MVA.

Distribución Secundario: Esta parte del sistema de potencia corresponde a los menores niveles de potencia y tensión. Estando más cerca del consumidor promedio (residencial). En Venezuela es común que las empresas eléctricas suministren potencia en cuatro niveles de tensión básicos y sus combinaciones 120/240V (1 ϕ ,2 ϕ) 208V (2 ϕ ,3 ϕ), 480 y 600 V (3 ϕ). De acuerdo a su configuración los sistemas de distribución pueden ser:

- *Radial:* muy económico y utilizado en sitios rurales y de baja carga.
- *Lazo o Anillo:* Se usa en cargas medias, con mediana confiabilidad.
- *Networks secundario:* Especialmente utilizado para grandes cargas, requiere mayor inversión y es caro.

Sistema de Sub-Transmisión

El sistema de sub-transmisión posee características muy similares del sistema de distribución, pero manejan mayor potencia (5 – 50 MVA) y se diferencian en que alimentan a un cierto número de subestaciones de distribución, los niveles de voltaje utilizados en Venezuela suelen ser: 69 kV, 34.5 kV, y 24 kV. El sistema de sub-transmisión se diferencia al de transmisión, debido a que el primero no realiza interconexiones entre sistemas de potencias o centrales de generación.

Breve Reseña Histórica de la Electricidad Comercial

La evolución tecnológica de la energía eléctrica cuenta en sus inicios con una serie de personajes que han sido calificados como destacados genios de la historia de la tecnología. Uno de ellos es Thomas Alva Edison (1847-1931). Su invención de mayor impacto en el uso masivo de la electricidad es la lámpara incandescente para producción en masa, en Octubre de 1879.

La trayectoria de Edison en la investigación e invención fue muy dilatada, en especial en el año de 1878 cuando anuncia que inventará una lámpara eléctrica segura y más barata como alternativa a las lámparas de arco y gas existentes al momento. Este anuncio es seguido por la formación de un grupo que financió el proyecto y que creó una compañía para tales fines, la "*Edison Electric Light Company*". Fue una de esas raras ocasiones en las que se financió una invención que no existía, sólo porque se confiaba en la trayectoria de Edison. Catorce meses después, Edison entregaría su invención que consistió fundamentalmente en la búsqueda de un filamento apropiado para la lámpara incandescente. Entonces las lámparas incandescentes fueron el motivo para la mayor divulgación de la energía eléctrica y las primeras cargas que se conectaron a los sistemas precarios de electricidad.

El suministro de electricidad sobre bases comerciales se basó inicialmente en generadores de corriente continua que alimentaban instalaciones especificadas como los sistemas de iluminación de calles, grandes almacenes y teatros. En enero de 1882 la *Holburn Viaduct Generating Station* (Central Generadora del Viaducto Holburn en Londres) comenzó a funcionar y ésta fue una de las primeras centrales de generación de energía eléctrica del mundo que se utilizaba para consumidores privados de modo general en oposición a las instalaciones especializadas. Este esquema comprendía un generador de 60 kW accionado por una máquina de vapor horizontal; la tensión de generación era de 110 Voltios de corriente continua.

El mismo año empezó a funcionar una central semejante en Nueva York. La planta eléctrica de *Menlo Park* brilló con treinta (30) lámparas, cada una de las cuales podía ser encendida y apagada individualmente.

Tres años más tarde la planta eléctrica de *Pearl Street* en el centro de la ciudad de Nueva York fue concluida marcando así el inicio de la iluminación eléctrica de las ciudades del mundo. La historia de Edison nos revela su evidente contribución en el desarrollo de la electricidad, pero también nos revela sus innovaciones como la creación de un laboratorio de investigación industrial y la novedosa forma de financiarlo (capital de riesgo). En resumen, Edison personifica al verdadero espíritu innovador y emprendedor que ha caracterizado al desarrollo tecnológico desde entonces.

Las redes iniciales de distribución de electricidad, como es el caso de la instalada por Edison en Nueva York, utilizaban corriente continua. Al aumentar el consumo, el cual ha crecido casi exponencialmente a nivel mundial desde principios de siglo, y al tener que recurrir a fuentes de energía abundante y económica como es el caso de la energía hidráulica, resultó que las fuentes de energía estaban ubicadas a considerables distancias de los centros de consumo. Esto planteó el reto de la transmisión de electricidad a largas distancias. Tal fue el

caso de la generación de electricidad en las Cataratas de Niágara, que debía ser transmitida a través de una distancia de 700 kilómetros a la ciudad de Nueva York.

Surgió el uso de la corriente alterna (1881) como tecnología que solventaba los problemas de la corriente continua, el desarrollo de las redes de corriente alterna, empezó en 1885 cuando *George Westinghouse* compró las patentes que protegían el sistema de transporte de corriente alterna, desarrollado por *L. Gaulard* y *J. D. Gibbs* de París.

La primera central importante de corriente alterna de Gran Bretaña se instaló en Deptford en donde la energía se generaba mediante máquinas de 10.000 HP, y se transmitía a 10 kV a los consumidores de Londres. Durante este período la batalla entre los defensores de la corriente alterna y los de la corriente continua alcanzó su nivel más intenso y agrio. Durante este mismo período tuvo lugar un desarrollo semejante en los Estados Unidos y en otros países del mundo. Debido principalmente al invento del transformador prevalecieron los defensores de la corriente alterna y comenzó un rápido desarrollo de las centrales generadoras de electricidad en locales de modo que cada gran ciudad o centro en el cual se consumía una cantidad importante de energía eléctrica tenía su propia central en funcionamiento. *William Stanley*, antiguo socio de *George Westinghouse* se dedicó a probar transformadores en su laboratorio de Great Barrington, Massachusetts. Allí en el invierno de 1885-1886, instaló Stanley la primera red experimental de distribución de corriente alterna que alimentaba inicialmente 150 lámparas de la ciudad. La primera línea de transmisión de corriente alterna se puso en funcionamiento en 1890, para llevar energía eléctrica, generada en una central hidroeléctrica desde Willamette Falls, hasta Portland, Oregón, distante una de las otras 13 millas (21 km).

Las primeras líneas de transmisión fueron de tipo monofásico, la energía era solo utilizada inicialmente para alumbrado, incluso los primeros motores eran de tipo monofásicos.

El 16 de mayo de 1888 *Nikola Tesla* (el mismo personaje que le dio el nombre a la unidad de inducción magnética) presentó un trabajo donde describía los motores de inducción monofásicos y los sincrónicos.; a partir de entonces la importancia de los motores polifásicos se hacían evidente especialmente en las exposiciones de Chicago de 1893, donde se mostró en público una red de distribución eléctrica bifásica. Las bondades de la corriente polifásica, y especialmente la trifásica fue gradualmente sustituyendo la corriente continua, para el año de 1894 en los Estados Unidos existían cinco (5) centrales de generación de las cuales una era bifásica y las restantes trifásicas. Esencialmente la rápida aceptación del sistema trifásico en corriente alterna, se debió a la existencia del transformador, que permite elevar los niveles de tensión de la generación para la transmisión aumentando la capacidad de transporte. Anecdóticamente, Edison perdió una licitación para instalar una línea de transmisión Niágara - Nueva York, al insistir en tecnología de corriente continua.

En la década de los cincuenta surge la corriente continua como posibilidad de transmitir energía eléctrica a grandes distancias, por su simplicidad y baja pérdidas comparada con la corriente alterna, y por la disponibilidad de los rectificadores de arco de mercurio. Estos últimos dispositivos electrónicos permiten la conversión de corriente continua a corriente alterna y viceversa, lo cual implica poder usar las ventajas de ambos sistemas: la eficiencia en transmisión en alto voltaje y largas distancias de la corriente continua, por un lado: y la eficiencia en distribución en distancias relativamente cortas y bajo voltaje de la corriente alterna, por el otro lado.

Hoy en día, se dispone de rectificadores controlados en estado sólido que permiten la conversión de corriente continua a corriente alterna con mucho mayor eficiencia. Irónicamente, Edison propuso transmitir energía en corriente continua y perdió una licitación: hoy ésta es una tecnología ampliamente dominada. Evidentemente, Edison estaba adelantándose al futuro.

El sistema de transmisión en corriente continua, ha sido demostrado que en países como los Estados Unidos que son económicamente inaceptables para longitudes menores a 350 millas (553 Km.) mientras que en países de Europa, donde las longitudes de las líneas son considerablemente mayores, existen en funcionamiento líneas de transmisión en corriente continua.

Con el transcurrir del tiempo la transmisión de energía eléctrica ha experimentado un crecimiento rápido en los niveles escalonados de tensión, esto surge como una respuesta al aumento paulatino de la demanda eléctrica, la primitiva red de 1890 instalada entre Willamette - Portland operaba a 3300 Voltios, en 1907 se funcionaba con tensiones de 100 kV, para 1913 la tensión aumentó hasta 150 kV, a 220 kV en 1926, a 287 kV en la línea de Hoover Dam a Los Angeles entro en servicio en 1936. Para el año de 1965 se puso en funcionamiento la primera línea de 345 kV. En 1965 se colocó en operación la primera línea de 500 kV; cuatro años después en 1969 se colocó en funcionamiento la primera línea de 765 KV. Hoy en día se experimentan con líneas en tensiones de operación de 1100 y 1500 kV, de hecho, la extinta Unión Soviética consta de una línea de 1200 kV, de 2500 Km. de longitud, para interconectar tres sistemas de potencia: Siberia, Kazah y Ural.

En el año de 1917, se efectuó la primera interconexión en los Estados Unidos, de esta manera, se unificó la frecuencia de operación y se comienza la producción más económica de energía, y además de aumentar la confiabilidad del sistema eléctrico. Estas interconexiones trajeron consigo grandes ventajas pero también un número considerable de problemas técnicos.

La lámpara incandescente por su lado ha sufrido innumerables mejoras desde su invención y ha encontrado un serio rival en la lámpara fluorescente que es más eficiente, es decir, obtenemos mayor luminosidad con menos energía eléctrica. Las lámparas fluorescentes habían restringido su uso a grandes áreas (industriales, oficinas, salones de clase, etc.) con muy poco uso en el hogar. Los avances recientes en microelectrónica han logrado sustituir los tradicionales balastos electromecánicos por balastos electrónicos de significativamente menores dimensiones y ha comenzado un proceso de uso intensivo de lámparas fluorescentes que sustituyen directamente las lámparas incandescentes en el hogar. Las nuevas lámparas se caracterizan por mayor eficiencia, confiabilidad y durabilidad. Esto constituye parte de una tendencia general de ahorro en el consumo de energía eléctrica que tiene detrás de sí los avances en nuevos equipos eléctricos de mejor desempeño que utilizan componentes microelectrónicos.

El suministrar energía eléctrica a una comunidad requiere de un complejo sistema de generación, transmisión y distribución de electricidad en escalas que superan en órdenes de magnitud aquella pequeña red de Edison en Nueva York. Los cambios tecnológicos experimentados en cada una de las etapas del proceso de llevar energía eléctrica al hogar o a la industria han sido dramáticos.

En el caso de la generación de electricidad hemos visto la incorporación de nuevas fuentes, como la energía eólica, fotovoltaica, celdas de combustible (*fuel cells*) y otras, además de las tradicionales fuentes de energía hidroeléctrica y termoeléctrica. En estas dos últimas, aún cuando han cambiado poco los principios básicos de funcionamiento, el énfasis ha estado en diseñar plantas de generación con mayor eficiencia, confiabilidad y con menos posibilidades de perturbar el medio ambiente incorporando técnicas más novedosas de diseño, simulación, nuevos materiales y las más recientes tecnologías de la información, control y telecomunicaciones. Es necesario destacar el caso de la energía nuclear que se utiliza como fuente de generación de vapor en plantas termoeléctricas, que ha sufrido serios reveses en seguridad con sus graves consecuencias en el medio ambiente (Chernobyl en Rusia y Thee Mile Island en los Estados Unidos) y al mismo tiempo ha resultado ser una energía costosa ante la sostenida baja de los precios de los combustibles tradicionales como petróleo, carbón y gas natural. La consecuencia inmediata de estos dos factores ha sido la salida de operación de varias plantas eléctricas nucleares en estados Unidos mucho antes de su período esperado de vida, lo cual podría significar el fin del uso de esta tecnología. Sin embargo, por razones de escasa disponibilidad de otros recursos energéticos y de seguridad nacional, otros países (los de Europa, por ejemplo) en el mundo han continuado el uso creciente de energía nuclear para la generación de electricidad. Es evidente que los esfuerzos tecnológicos estarán orientados a mejorar la seguridad, confiabilidad y a disminuir los costos de las plantas nucleares.

En los últimos diez años ha existido una efervescencia en los medios científicos ante la posibilidad de obtener materiales superconductores, comercialmente disponibles, que funcionen a temperatura ambiente. Los materiales superconductores permiten que la corriente eléctrica fluya en su interior sin resistencia, que es la fuente más frecuente de pérdidas y recalentamiento de los materiales eléctricos tradicionales. Sin embargo, la superconductividad sólo se observa en algunos conductores a temperaturas por debajo del helio líquido y cercano al cero absoluto (-273° Celcius). Desde 1911, cuando la superconductividad fue observada por primera vez por el científico holandés *Heike Kamerlingh Onnes* (quién ganó el premio Nobel en 1913 por este descubrimiento), hasta nuestros días, la ciencia no ha cesado de la búsqueda de aleaciones superconductoras a temperatura ambiente.

Hasta ahora sólo se han logrado cerámicas superconductoras que funcionan a 95 grados Kelvin a nivel de laboratorios, en resultados presentados por los físicos *Ching-Wu Chu* y *Maue-Kuen Wu* de los Estados Unidos, en la reunión anual de la Sociedad Americana de Física en Nueva York a principios de 1987. En esta tormentosa reunión la exclamación general fue "*nuestras vidas han cambiado*", dado el impacto revolucionario que tendría en las tecnologías existentes de generación, transmisión y almacenamiento de electricidad. Los esfuerzos científicos y tecnológicos de muchos grupos de investigación a nivel mundial están en la incesante búsqueda de nuevos materiales. Es de mencionar que existen unidades comerciales de generación que utilizan superconductores que están enfriados a -269° Kelvin, desarrollados por "*Westinghouse*" y "*General Electric Co.*" separadamente.

Evolución de la Técnica en los Equipos de Sistemas Eléctricos de Potencia

Debido al continuo aumento experimentado en los últimos veinte años en los escalones de voltaje adoptados para el transporte económico de la energía eléctrica y debido a que el paso de un voltaje nominal a otro más elevado trae consigo siempre asociado la resolución de problemas sumamente complejos, tanto desde el punto de vista de los estudios en el laboratorio como en la aplicación constructiva de los equipos para obtener instalaciones que satisfagan las más rígidas condiciones con la máxima economía, se ha preferido profundizar en el tema de las tensiones elevadas, dejando a un lado lo concerniente a las bajas y medias tensiones por no implicar problemas especiales con la evolución de la técnica actual y por el hecho de que se tiende para estas instalaciones a la construcción de unidades modulares normalizadas.

El crecimiento constante de la carga y del consumo de energía eléctrica, motivados principalmente por el desarrollo industrial y la elevación del nivel de vida de las poblaciones requieren una mayor ampliación periódica de los sistemas eléctricos de generación y distribución. Un crecimiento anual acumulativo del 10% de la demanda eléctrica significa la duplicación de las instalaciones de generación cada siete años y un crecimiento de 7% que corresponde normalmente a los países industrializados, representa duplicar la capacidad de generación cada diez años.

A fin de atender la demanda se ha de instalar suficiente generación para poder atender los requerimientos. Durante el período 2000-2004 en Venezuela, la capacidad nominal del SIN aumentó inter-anualmente 2% al registrar al final de 2004, una capacidad total de 21.198 MW. Esta variación se debe principalmente a la expansión de la capacidad de generación hidráulica mediante el aprovechamiento del bajo Caroní. En este sentido, desde el año 2000 la proporción entre la capacidad hidráulica y la térmica se ha mantenido aproximadamente en 2:1.

Tabla 3. Capacidad Instalada del Sistema Interconectado Nacional, Período 2000-2004

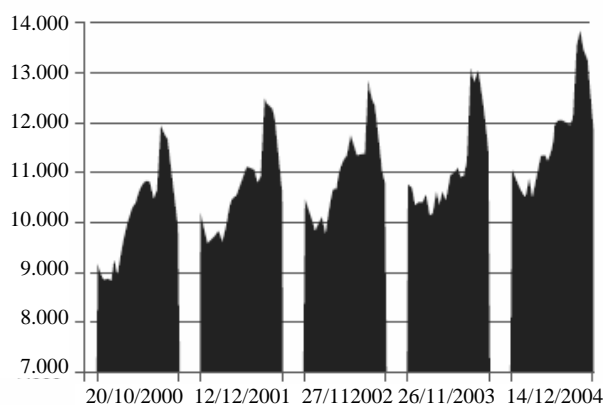
	<i>Empresa</i>	2000	2001	2002	2003	2004	<i>Variación Interanual (%)</i>
Capacidad Instalada en MW	CADAFE	3.619	3.619	3.578	3.588	3.658	0.3
	EDELCA	11.845	11.845	11.845	12.565	13.285	2.9
	EDC	2.255	2.341	2.316	2.316	2.236	-0.2
	ENELVEN	1.175	1.175	1.175	1.475	1.409	4.6
	ELEVAL	213	213	213	213	198	-1.9
	ENERBAR	151	151	151	151	130	-3.7
	ENELCO	40	40	40	40	40	0.0
	SENECA	250	250	250	250	232	-1.9
	SEMDA	0	0	0	0	10	100.0
	SISTEMA	19.549	19.635	19.569	20.619	21.198	2.0

En lo que a demanda del Sistema Interconectado Nacional se refiere, el período 2000-2004 se caracterizó por presentar un crecimiento interanual de 3,7%, al pasar de 11.938 MW en 2000 a 13.807 MW en 2004. Este crecimiento se debió principalmente al incremento interanual de la demanda de CADAFE 5%, cuya carga aumentó homogéneamente en sus tres áreas, y al de EDELCA 4,5%. Por otra parte, las empresas EDC y ENELVEN contribuyeron con el crecimiento interanual del SIN en 1% y 3% respectivamente.

Tabla 4. Demanda Máxima Sistema Interconectado Nacional, Período 2000-2004

	<i>Empresa</i>	<i>2000</i>	<i>2001</i>	<i>2002</i>	<i>2003</i>	<i>2004</i>	<i>Variación Interanual (%)</i>
Demanda Máxima en MW	CADAFE	4.104	4.326	4.576	4.637	4.997	5
	EDELCA	3.422	3.495	3.699	3.829	4.076	4.5
	EDC	1.812	1.888	1.868	1.319	1.395	1
	ENELVEN	1.241	1.317	1.317	1.319	1.395	3
	ELEVAL	237	246	239	238	249	1.2
	ENERBAR	504	497	485	492	520	0.8
	ENELCO	580	657	606	613	615	1.5
	SENECA	221	218	213	205	222	0.1
	SEMDA	298	303	281	293	352	4.3
	SISTEMA	11.938	11.463	12.813	13.052	13.807	3.7

La siguiente gráfica muestra la evolución de la demanda máxima del sistema:



Para poder cubrir satisfactoriamente las necesidades del crecimiento de los consumos eléctricos se requieren cada vez mayores inversiones de dinero y para que el uso del capital sea rentable se tiene a la elevación de la potencia unitaria de las unidades de generación para disminuir su costo específico y a la interconexión entre centrales eléctricas, a fin de reducir al mínimo técnico las unidades de reserva, con el consiguiente ahorro en los costos de generación. Por esta razón hoy en día se construyen unidades termoeléctricas de 1000 MW y 1350 MW, y las reservas se reducen a valores del 10% al 15% de la capacidad total instalada.

Para transmitir las grandes potencias a los centros de consumo, están o no alejados de las fuentes de generación, se necesitan líneas de transmisión, subestaciones elevadoras de tensión en las centrales eléctricas y subestaciones reductoras de tensión en los centros de carga. Estas potencias pueden transportarse con muchas líneas de transmisión a tensiones medianamente altas o con pocas o una sola línea en altas o en muy altas tensiones.

El interés de utilizar tensiones cada vez más altas para transmitir potencias muy elevada se justifica debido que al duplicar la tensión de servicio se cuadruplica aproximadamente la potencia de transporte. Se desprenden en consecuencia que la utilización de tensiones cada vez más grandes se hace un requisito básicamente económico.

Evolución Histórica del Sistema de Transmisión Venezolano

Antes de la instalación de la Central Hidroeléctrica Macagua I, en Ciudad Guayana existían dos centros principales de generación de energía; el de CADAFE, que abastecía a San Felix por medio de plantas del tipo diesel y el de la *Orinoco Mining Company*, que distribuía a su propio campo industrial y al Puerto Ordaz con otra planta termoeléctrica.



Figura 6. Líneas de Transmisión de 765 kV, salida de la Subestación Guri, propiedad de EDELCA, Guri, Edo Bolívar, Venezuela.

En el año de 1958 se inaugura la planta hidroeléctrica Macagua I, se establece la pionera del desarrollo hidroeléctrico del Caroní, poniendo en servicio el primer sistema de transmisión propiedad de la empresa CGV Electrificación del Caroní, (EDELCA), una sencilla red constituida por una línea de transmisión a 34.5 kV. en forma de anillo, que abastece el embarque de mineral de hierro de Palua, cerca de San Felix, las instalaciones de lo que era la *Orinoco Mining Company*, ahora Ferrominera del Orinoco CVG, y la subestación Castillito desde donde se alimenta Puerto Ordaz. También forma parte de esta red la línea de dos circuitos a 115 kV., que transmite energía a la Siderúrgica del Orinoco. CVG. Electrificación del Caroní EDELCA cumple con dos funciones como empresa eléctrica: generar y transmitir grandes bloques de energía; mientras que las operaciones de distribución de energía a clientes específicos queda a cargo de empresas como CADAFE y C.A La Electricidad de Caracas ELECAR, entre otras.

En el año de 1960, se garantiza una energía económica y abundante proporcionada por Macagua I, siendo la base de la expansión industrial de Guayana, permitiendo la instalación de diferentes empresas, creando un gran número de empleos y un acentuado crecimiento demográfico en menos de una década contribuyendo con la descentralización de las actividades económicas del país. Para 1966, comienza la ejecución de la primera etapa de la central hidroeléctrica Gurí, se construye la subestación Guayana, ubicada en el área de Matanzas, y se instala la primera línea de transmisión a 230 kV, operada en Venezuela. Durante 1966, se energizó la segunda línea de dos circuitos a 115 kV para Sidor y otra de un circuito a 34.5 kV para servir las poblaciones de Upata y El Pao.

El 28 de Agosto de 1968 entra en funcionamiento el *Sistema Interconectado Nacional (SIN)* entre las empresas EDELCA y CADAFE, esto se realiza a través del enlace de los centros de generación de Oriente, Centro y Guayana, con una línea a 230 kV tendida por CADAFE desde la subestación Guayana hasta la subestación Santa Teresa del Tuy. Esta interconexión contaba originalmente con un sistema de dos líneas a 230KV que unía a Guayana con la Región Central cubría principalmente las zonas de Guayana, oriente centro de Venezuela incluidas las poblaciones cercanas a Barquisimeto.

En ese mismo año, EDELCA amplió su red regional con la puesta en servicio de una línea a 115 kV para Alcasa y el parcelamiento industrial de Matanzas, y otras líneas a 35.4 kV para las subestaciones abastecedoras de Puerto Ordaz, Los Olivos y Castillito. También se instala una línea de 34.5 kV que parte de la subestación Macagua hasta la subestación Chirica donde CADAFE distribuye energía a San Félix.

Una vez entendida cabalmente la conveniencia de alimentarla con hidroelectricidad la región central del país desde Gurí, se realizaron los estudios para seleccionar el sistema de transmisión más apropiado para esta interconexión. Como antecedente se tenía el sistema de 230 kV de la subestación Guayana - Santa Tera, construido por CADAFE, pero el nuevo sistema requiera una mayor capacidad para transportar energía generada por la primera etapa de Gurí.

Finalmente luego del estudio técnico económico, se selecciona el sistema de transmisión a 400 kV, (utilizados desde 1969 en países como Rusia, USA, Australia, Canadá, Egipto, Japón, México, Inglaterra, Brasil y Argentina). Con el cual Venezuela entra en el rango de transmisión denominada Extra Alta Tensión (EAT) La primera línea entra en operación en 1969 con esta se amplía el ámbito de operación hasta la ciudad de Barinas en el occidente del país y la segunda en 1975.

El sistema de 400 kV, se compuso originalmente de dos líneas de transmisión que van desde Gurí hasta la subestación Santa Teresa pasando por las subestaciones el Tigre y San Gerónimo. El sistema de 400 kV construido por la empresa EDELCA se ha expandido en los últimos años de manera muy rápida, como consecuencia de el aumento de la demanda a nivel nacional.

Tabla 5. Crecimiento del Sistema de Transmisión de 400 kV de EDELCA

<i>Año</i>	<i>Km. De Líneas</i>	<i>Número de Líneas</i>
1968	-	-
1969	568	2
1974	568	2
1976	1128	6
1978	1196	7
1980	1332	9
1986	1353	11
1995	2608	18

En 1976, como consecuencia de una modificación en los planes de expansión de generación (Planta Centro y Ampliación de Tacoa) así como la incorporación de otras áreas, las empresas integrantes del Sistema Interconectado Nacional designaron una comisión para elaborar un nuevo contrato de interconexión, que contemple la incorporación del occidente del país. Este contrato de mayor flexibilidad a las empresas integrantes del Sistema Interconectado respecto a los costos de tarifas y la definición de los intercambios de energía.

Con la puesta en servicio por parte de EDELCA del sistema de transmisión a 765 kV desde Gurí hacia las subestaciones La Horqueta y La Arenosa a inicios de 1986 y la subestación Diego de Lozada en 1989 se da un gran poso en el sistema de transmisión venezolano. A inicios de 1986, EDELCA pone en servicio el sistema de transmisión en 765KV Gurí - Región Central, obra pionera en su nivel de tensión en Venezuela, que consta de dos líneas de 630 Km, de longitud cada una, así como una subestación terminal en Gurí, dos intermedias y dos subestaciones terminales en Villa de Cura estado Aragua, y Tocuyito estado Carabobo, respectivamente.

**Figura 7. Líneas de Transmisión a 765 kV propiedad de EDELCA, Guri, Edo. Bolivar, Venezuela**

En forma más detallada este sistema esta conformado por dos etapas:

- *Primera Etapa:* comenzó a implementarse desde el 15 de febrero de 1986, esta compuesta por dos líneas de 1237 Km. de longitud (4 conductores por fase ACAR 1300 MCM 18/19). Estas siguen la ruta Gurí - La Horqueta (Villa de Cura) y Gurí - La Arenosa (Tocuyito), pasando ambas por Malena y por San Gerónimo (cerca de Valle de la Pascua). El tramo Gurí - San Gerónimo, las líneas de transmisión se encuentran separadas una distancia de 1 Km, durante casi toda su extensión, y a partir de unos 50 Km. al noroeste de la subestación San Gerónimo, se separan en dos rutas diferentes para dirigirse una a Villa de Cura (La Horqueta) y otra a Tocuyito Edo. Carabobo (La Arenosa).
- *Segunda Etapa:* se puso en operación el 15 de Diciembre de 1990, consistió en la construcción de la tercera línea a 765 kV. de 550 Km. de longitud. Esta sigue la ruta Gurí - Subestación Sur, pasando por la subestación Malena y por la subestación San Gerónimo. Asociada a esta tercera línea se construyó la subestación Sur a 765 kV. También forma parte de esta segunda etapa, la construcción de las líneas de interconexión entre las subestaciones Sur - La Horqueta - La Arenosa - Yaracuy (273 Km.), lo cual involucra la construcción de las subestación Yaracuy a 765 kV. (en Yaritagua) y las ampliaciones de las subestaciones La Arenosa y La Horqueta. La interconexión del sistema eléctrico nacional ha sido considerablemente reforzada con un gran número de líneas puestas en operación en extra alta tensión además de aumentar la energía generada por EDELCA, por parte de CADAFE y La Electricidad de Caracas.