

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción.

Durante décadas el hombre se ha interesado cada vez más por mejorar día con día la calidad, disponibilidad y confiabilidad de los servicios que le brindan mayor comodidad y un mejor nivel de vida, uno de ellos es el caso al que haremos referencia en el presente trabajo de tesis: el suministro de energía eléctrica.

Con el único y primordial objetivo de lograr mejoras en los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), se elaboran diversos estudios, en los cuales se analizan los problemas y limitaciones relacionados con la transmisión de energía eléctrica y las distintas causas que los originan.

Por otro lado, el incremento en la demanda de energía eléctrica continúa aumentando de manera constante: especialmente en países que se encuentran en vías de desarrollo. Sin embargo, debido a las restricciones ambientales, económicas y sociales, los sistemas de transmisión y generación de energía no siempre pueden mantener el acelerado ritmo de crecimiento propio de la demanda. El conseguir los derechos de paso es difícil hoy en día y obtener los permisos de construcción necesarios requiere de mucho tiempo. Además, la implementación de líneas de transmisión y/o plantas de generación implica destinar recursos económicos, que bien podrían, ser invertidos en proyectos de distinta índole.

Según el “*North American Electric Reliability Corp*”, se espera que la demanda de energía crezca dos veces más rápido que la capacidad que pueda ser instalada en los próximos años. Para América del Norte los picos de demanda de electricidad están pronosticados para aumentar a casi un 18% (135 000 MW) en los próximos 10 años, mientras tanto, los proyectos y recursos para satisfacer la demanda, incluyendo los programas de respuesta a la demanda, son estimados para aumentar tan solo 8.5% (77 000 MW). [1]

Otro factor que afecta el balance de demanda-generación es que en la actualidad, el mercado energético ha sufrido procesos de reestructuración. La planeación y operación del sector eléctrico ha dado paso a estructuras de mercado competitivas en

cada uno de los sectores en que se dividen los sistemas eléctricos de potencia: hoy en día existen países con mercados en generación, transmisión, distribución y comercialización.

La meta final de los sistemas eléctricos con diferentes niveles de mercado es, permitir un intercambio eficiente y no discriminatorio de energía entre generadores y consumidores, minimizando pérdidas y maximizando la capacidad de transporte de energía, permitiendo entregar a los usuarios finales una energía confiable y de alta calidad a un razonable costo.

Temas muy importantes, como interconexiones con otros países habían quedado fuera de las agendas del desarrollo energético por ausencia de proyectos rentables, mientras que a la par temas como el de la calidad y seguridad de suministro no eran tomados en cuenta como medios que entregasen señales adecuadas de inversión a capitales privados.

La energía además debe cumplir con parámetros básicos de calidad y confiabilidad. Para alcanzar estos niveles se requiere de importantes cambios tecnológicos y en la actualidad el sector eléctrico se encuentra en un proceso de reestructuración, donde se consideran temas como: la integración de energías renovables, optimización de los sistemas existentes, la regulación de tarifas en transmisión y distribución, reglamentos de interconexión; destacando en parte lo importante que resulta ser la red de transmisión en la creación de factores que fomenten la competencia y a su vez la calidad del servicio eléctrico.

En México, la red eléctrica ha evolucionado incorporando nuevas tecnologías que han permitido la modernización de su red eléctrica. Estos avances comenzaron en el año 1982 con la instalación de los primeros Compensadores Estáticos de VAR's (SVC) dentro de la subestación Temascal en el estado de Oaxaca y en el estado de Chihuahua dentro de la subestación de Santa Ana.[2].

A nivel nacional, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), es el organismo descentralizado encargado y responsable de la planeación, operación y modernización de los sistemas eléctricos mediante la Subdirección de Programación: Generación, Transmisión y Sub transmisión. [2]

Una de las áreas más beneficiadas con los avances tecnológicos es sin lugar a dudas la transmisión de energía. Los operadores buscan formas de optimizar el uso de las

líneas de transmisión existentes, para lo cual se requiere especial atención en dos sectores:

- a) En primer lugar, hay una necesidad de mejorar la estabilidad tanto en régimen permanente como en régimen transitorio de las líneas de gran longitud.

Las líneas de transmisión no pueden transportar un alto flujo de corriente sin exceder sus límites térmicos. Las medidas que se han tomado para mejorar la estabilidad durante y después de una falla de la línea pueden mejorar la fiabilidad del sistema.

- b) En segundo lugar, es necesario mejorar el flujo de potencia en redes estrechamente interconectadas, ya que el flujo natural de potencia resultante no es necesariamente el flujo para el cual son mínimas las pérdidas de transmisión.

En la planeación de una red de transmisión se desarrolla una variada gama de métodos de optimización que incorporan herramientas de análisis tanto en estado estable como transitorio, entre los más relevantes encontramos:

- Análisis de flujo de potencia (FP).
- Análisis de flujo de potencia óptimo (OPF).
- Análisis de cortocircuito y confiabilidad.
- Análisis de fallas.
- Análisis de armónicos.
- Análisis de estabilidad transitoria.
- Análisis de estabilidad de tensión.
- Análisis de coordinación de protecciones.
- Análisis de arranque de motores.
- Análisis de estabilidad en pequeña señal.
- Análisis de capacidad de transmisión disponible.
- Análisis del efecto de la potencia activa y reactiva en el voltaje.

Uno de los estudios más empleado para la planeación y operación de un sistema eléctrico es el análisis de flujos de potencia, el cual supone que el sistema opera en un equilibrio entre potencia generada y potencia demandada, pudiendo ser descrito

por un conjunto de ecuaciones algebraicas y métodos numéricos que determinan las variables del estado de equilibrio o régimen permanente. En el caso del flujo de potencia estas ecuaciones se resuelven mediante métodos iterativos tales como Newton-Raphson y Gauss-Seidel, los cuales pueden ser implementados en algún modelo de programación para obtener los valores de interés o bien podemos emplear software comercial tales como: PSS<sup>®</sup>E, NEPLAN<sup>®</sup>, ASP<sup>®</sup>, EDSA, entre otros, para determinar las direcciones de flujo y los parámetros de las redes.

Las herramientas de análisis deben ser capaces de incorporar condiciones cambiantes de desarrollo, tales como nuevos modelos de diseño y mercado, así como la aparición e implementación de nuevos equipos capaces de mejorar la operación de los SEP's. Una de las tecnologías emergentes y usadas para optimizar y modernizar un sistema eléctrico son los denominados Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS). [4,7]

Los equipos FACTS permiten lograr una máxima utilización del sistema de transmisión, minimizando pérdidas y maximizando la capacidad de transmisión de energía, además de generar externalidades que pueden ser consideradas como señales económicas de inversión, tales como la realización de contratos sin afectar a terceros, manejo de interconexiones y criterios de calidad y seguridad de servicio.

Los FACTS, son equipos basados en sistemas de control, electrónica de potencia, equipos computacionales, telecomunicaciones y equipos de compensación tradicional (transformadores, reactores, bancos de capacitores), que actúan directamente sobre uno o más de los parámetros propios de la red de transmisión, permitiendo un control del flujo potencia tanto activa como reactiva en distinto grado según las características del equipo, lo cual será tratado más adelante.

## **1.2 Antecedentes.**

- **Principios de Transmisión de Potencia Eléctrica.**

A pesar de la naturaleza compleja de un sistema de potencia actual, las relaciones básicas de la transmisión de potencia pueden ser derivadas mediante un simple modelo de dos sistemas, en el cual un sistema en el extremo emisor es interconectado mediante una línea de transmisión con el sistema en el extremo receptor [4], ver Figura 1.1.

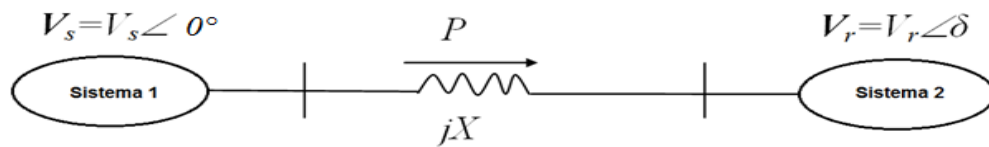


Figura 1.1 Modelo simple de dos sistemas.

En donde:

$V_s$ , es la magnitud del voltaje del sistema emisor.

$V_r$ , es la magnitud del voltaje del sistema receptor.

$\delta$ , es el ángulo de fase entre  $V_s$  y  $V_r$  (ángulo de transmisión o carga).

$X$ , es la reactancia de la línea que conecta ambos sistemas.

La potencia activa transmitida por la línea del sistema de envío al de recepción es:

$$P = \frac{V_s V_r}{X} \sin \delta \quad (1.1)$$

La Figura 1.2 muestra la curva obtenida de la ecuación (1.1). Observando la Figura 1.2 es evidente que la máxima transferencia de potencia en estado estable ocurre cuando  $\delta = \pi/2$ .

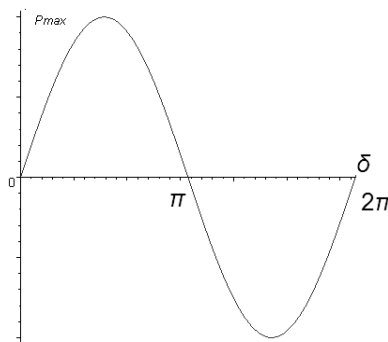


Figura 1.2 Característica de la potencia activa.

La siguiente ecuación determina el límite máximo de transmisión de potencia de la línea para estado estable.

$$P_{max} = \frac{V_s V_r}{X} \quad (1.2)$$

- **Flujo de Potencia en Redes de Transmisión.**

En los sistemas de potencia de CA, la generación y carga deben ser equilibradas en todo momento.

Se sabe que la potencia transmisible en estado estable puede ser aumentada y que el perfil de voltaje, a lo largo de la línea, puede ser controlado mediante una apropiada compensación e incluso se puede mantener constante. El propósito de esta compensación es el de cambiar las características eléctricas naturales de la línea para hacerla controlable y regular los flujos de potencia sobre ella.

Cuando la potencia generada es la adecuada, los flujos de potencia activa serán de las áreas de generación hacia las áreas de demanda, y fluye a través de todos los caminos disponibles que generalmente incluyen líneas de alto y medio voltaje. Lo anterior ocasiona flujos indeseados que incrementan las pérdidas.

Los sistemas de potencia están expuestos a varias perturbaciones tales como incrementos y/o decrementos de cargas, fallas en las líneas, equipos y maniobras, las cuales pueden causar cambios repentinos en el balance de la potencia activa del sistema y la consecuente aceleración y desaceleración de ciertas máquinas.

La capacidad del sistema para recobrase de estas perturbaciones y regresar al estado estable bajo condiciones de contingencia, se convierte en un criterio básico de diseño y operación para la capacidad de transmisión. Esta capacidad es usualmente caracterizada por la estabilidad transitoria y dinámica del sistema. Un sistema de transmisión es *transitoriamente estable* si puede volver a una operación normal después de una perturbación importante. Similarmente el sistema es *dinámicamente estable* si es capaz de recobrase de una perturbación menor. La *estabilidad dinámica* indica la característica de amortiguamiento del sistema. Una *inestabilidad dinámica* significa que una perturbación menor puede llevar a oscilaciones de potencia crecientes y a una eventual pérdida de sincronismo. [6]

- **Límites de Transmisión.**

La capacidad de transferencia de energía está sujeta a un número de factores que alteran la operación de los sistemas de potencia, las condiciones atmosféricas, el material, el tamaño y disposición geométrica de los conductores, son algunos de ellos, estas pueden ser clasificadas de forma general en general:

- a) Restricciones físicas de la línea: La principal limitación física de la línea es la impuesta por sus propios límites térmicos.

b) Límites impuestos por la red: En el caso de líneas largas, dos tipos de límites tienen que ser considerados: los de estado estable y transitorio. El límite de estado estable, como su nombre lo dice, se debe a las restricciones en la operación en estado estable. Los límites de transitorios por otro lado, son impuestos por la habilidad del sistema a recobrase de una perturbación. [6]

- **Control de Potencia Reactiva.**

A modo de explicación se presenta la Figura 1.3a) donde el circuito mostrado representa una impedancia  $Z$  con un determinado ángulo  $\phi$ , el cual implica un atraso o adelanto de la corriente respecto al voltaje, esto dependerá del tipo de carga que sea conectada, es decir capacitiva o inductiva, lo cual es reflejado en la gráfica de la Figura 1.3b). Si consideramos una carga puramente resistiva, el fasor de voltaje y corriente se encontrarán en todo momento en fase ( $\phi=0^\circ$ ), es por ello que un valor  $\phi \neq 0^\circ$ , implica la presencia de impedancias capacitivas y/o inductivas, las cuales representan un consumo o generación de potencia reactiva.

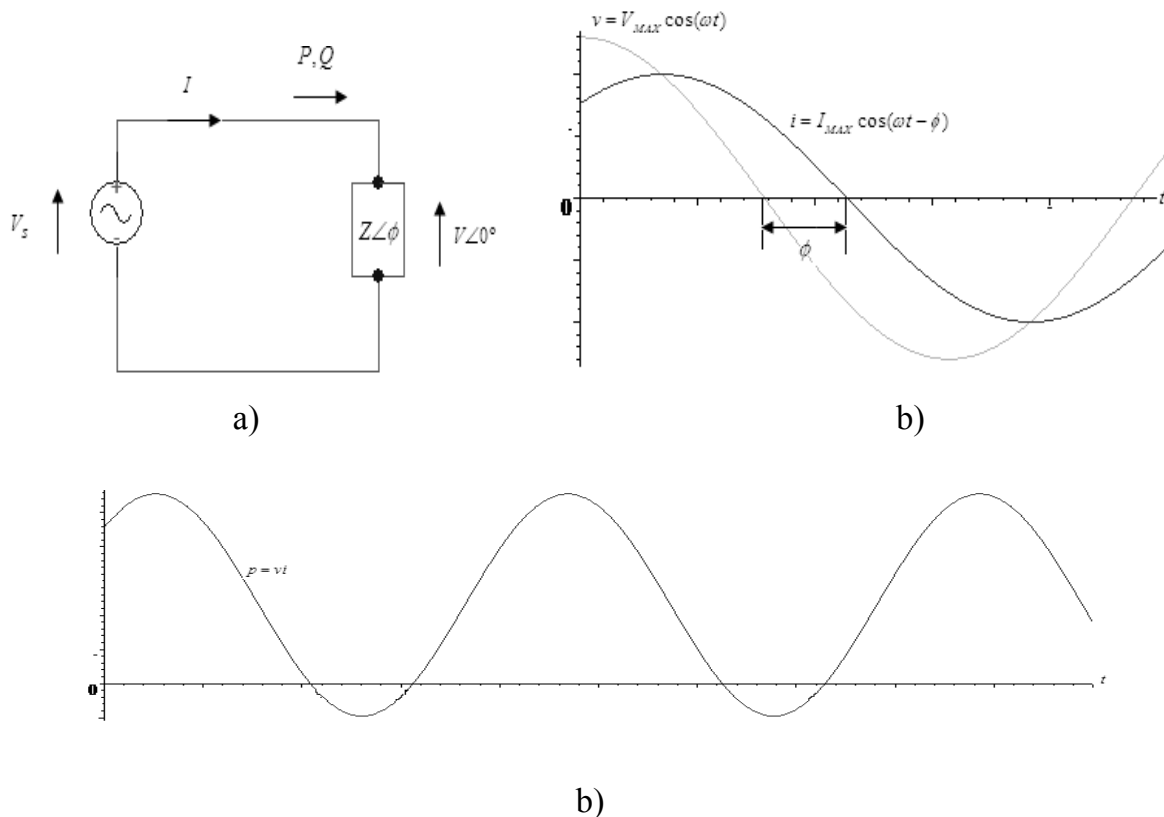


Figura 1.3 a) Representación de las pérdidas reactivas en un SEP y b) Formas de onda de voltaje, corriente y potencia para el circuito.

La energía consumida para producir los distintos campos magnéticos propios de los equipos tales como motores, transformadores y generadores que componen una red de transmisión, representan dichas pérdidas de tipo reactivo y son conocidas como pérdidas magnéticas o pérdidas por consumo de potencia reactiva [7].

- **Líneas de Transmisión Descompensadas.**

En la Figura 1.4 se considera un caso simple, una línea de transmisión corta, con su impedancia propia conectada a una fuente y para simplificar la línea, ésta solamente tendrá reactancia de tipo inductiva, en el siguiente esquema se muestran los parámetros a) y el diagrama fasorial b), donde aparecen las relaciones entre voltajes y corrientes.

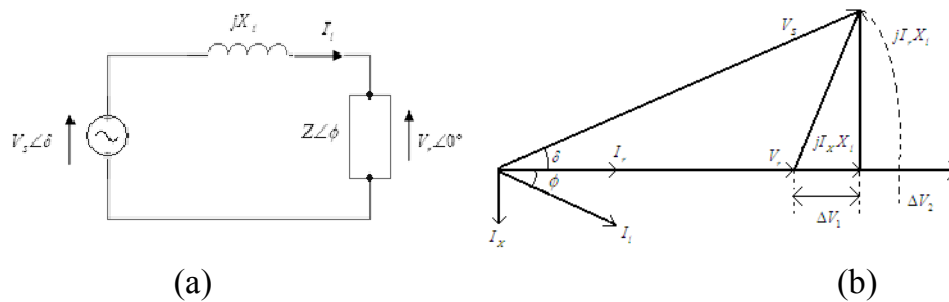


Figura 1.4 a) Línea de transmisión corta y b) Diagrama fasorial.

Del análisis del diagrama fasorial es claro que se presentan pérdidas entre el voltaje enviado desde la fuente  $V_s$  y el voltaje recibido en  $V_r$ , ó también se puede considerar como una variación de magnitud donde se crea una diferencia de fase. La parte más significativa de la caída de voltaje en la línea, está determinada por la componente reactiva  $I_x$ , ( $\Delta V_1 = j I_x \bar{X}_l$ ).

Para mantener el voltaje en cualquier punto en la red a un valor cercano al de la fuente se pueden realizar las siguientes dos acciones:

**a) Compensación de Carga.**

Es posible compensar la componente reactiva de la corriente agregando una carga capacitiva de tal modo que  $I_c = -I_x$ , esto hace que el factor de potencia se vuelva unitario y de este modo se elimina la caída de voltaje ya que se presenta la ausencia



de la componente reactiva  $I_x$ . Así el valor en magnitud de  $V_r$  es más cercano al de  $V_s$ . Hay que aclarar que la utilización de la compensación de carga no elimina totalmente la caída de voltaje, solo la reduce.

**b) Compensación de Sistema.**

Para regular el valor de voltaje que se recibe al final de la línea, con el voltaje nominal de la misma es muy útil la instalación de algún tipo de compensador de potencia reactiva y/o activa, tal como se muestra en la Figura 1.5a). Este compensador proporciona formas de onda de potencia reactiva para vencer ambas componentes de caída de voltaje  $\Delta V_1$  y  $\Delta V_2$  como consecuencia de la corriente de carga  $I_l$  por la reactancia de la línea  $X_l$ , para compensar  $\Delta V_2$ , se suministra una corriente capacitiva  $\Delta I_c$  con un valor más alto que  $I_c$  para compensar  $I_x$ . Cuando  $\Delta \bar{I}_c X_l = \Delta V_2$ , el voltaje que se recibe al final de la línea, es decir  $V_r$ , es igual al voltaje al principio de la línea  $V_s$ , tal como lo muestra el diagrama fasorial, de la Figura 1.5b).

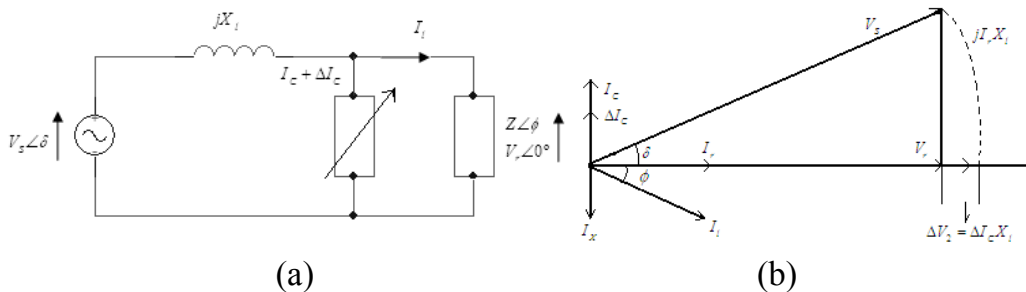


Figura 1.5 a) Compensación de sistema b) Diagrama fasorial del sistema compensado.

Si se considera que la compensación se realiza en el punto medio del sistema, entonces ante cargas bajas la línea de transmisión es sobre compensada. El incremento de voltaje a lo largo de la reactancia serie es mayor que la caída de voltaje debida a la corriente de carga; como resultado, el voltaje de línea se incrementa alcanzando su máximo en el punto medio. Este exceso de corriente de carga también fluye a través de los extremos emisor y receptor forzándolos a absorber la correspondiente potencia reactiva (capacitiva).

Ante cargas mayores que la impedancia la línea está sub-compensada, esto es, que el incremento del voltaje resultante de la capacitancia en derivación es insuficiente para cancelar la caída de voltaje a lo largo de la reactancia serie de la línea debida a la corriente de carga. Por lo tanto el voltaje a lo largo de la línea disminuye, alcanzando su mínimo en el punto medio, en este caso la demanda de potencia reactiva de la red (inductiva) debe ser suministrada por los sistemas en los extremos emisor y receptor.

Los compensadores son utilizados e instalados por las empresas que suministran el servicio de energía eléctrica para asegurar la calidad de suministro para sus clientes [8]. Los dispositivos convencionales más empleados para cumplir dicho objetivo son los bancos de capacitores y reactores conmutados mecánicamente.

### **1.3 Objetivos.**

- El objetivo fundamental de este trabajo de tesis es realizar un estudio comparativo técnico-económico de dos tipos de compensadores en paralelo, pertenecientes a la familia de los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna. Además se busca establecer los posibles beneficios que brindan como una de las alternativas a compensadores convencionales, para mejorar la transmisión de potencia en un sistema eléctrico.
- Presentar el modelo matemático en estado estable y a frecuencia fundamental de ambos controladores FACTS (SVC y STATCOM), contemplando específicamente las ventajas y desventajas tanto técnicas como económicas con ejemplos puntuales. De este modo se han elegido niveles representativos de modelación, lo que entrega una visión bastante equilibrada de la dificultad del tema.
- Estudio y análisis de los modelos y el comportamiento de ambos controladores mediante el software NEPLAN<sup>®</sup>.
- Elaborar un análisis económico desglosado para cada uno de estos compensadores, considerando los aspectos más determinantes en la implementación de un proyecto.

#### **1.4 Justificación.**

Se realizó un estudio para dos equipos que pertenecen a la conocida familia de controladores FACTS. Los equipos que serán estudiados y analizados son los compensadores en conexión paralelo: Compensador Estático Síncrono (STATCOM) y el Compensador Estático de VAR's (SVC), destacando que las razones para su elección fueron las siguientes:

- El compensador estático de VAR's (SVC) representa el principio del desarrollo de la tecnología FACTS, siendo un equipo bastante sencillo para modelar y el único dispositivo de esta tecnología instalado en la red eléctrica mexicana.
- Por otro lado el STATCOM representa una significativa evolución desde el punto de vista técnico-funcional.
- Del mismo modo consideraremos de una forma breve y concisa el que quizá sea el factor más importante en la toma de una decisión, el aspecto económico.
- Desde el punto de vista del análisis estacionario, ambos equipos permiten reflejar todas las posibilidades que ofrecen en el control de tensión y en el control de flujos, siendo bastante representativos para tales efectos.
- Por último, existe experiencia internacional con respecto a la utilización de estos dos equipos, por lo que este estudio adquiere, además de una connotación académica, otra también práctica y con una visión a futuro dentro del ámbito de factibilidad para la introducción de estos equipos en el sistema eléctrico nacional.

#### **1.2 Logros.**

En el presente trabajo de tesis se ha logrado cumplir con los objetivos antes mencionados, los cuales en pocas palabras son mostrar las características, funcionamiento y beneficios que aportan los controladores estudiados dentro de un sistema eléctrico de potencia, incidiendo de manera puntual en las ventajas y desventajas de los equipos SVC y STATCOM, con ayuda del software NEPLAN<sup>®</sup>

se logró simular una red de cinco nodos la cual sirvió como red de prueba y donde se han analizado y se han comparado las respuestas de cada uno de los controladores frente a fenómenos tanto en estado estable, (en donde se hizo uso del concepto de flujos de potencia), como es estado transitorio para una serie de perturbaciones.

De manera simple se ha podido comprobar que la incorporación adecuada de los equipos FACTS a una red de transmisión de energía eléctrica y bajo el concepto de flujos de potencia, el STATCOM en particular ofrece un comportamiento superior respecto a un determinado caso base optimizando el sistema. Por otro lado, en estado transitorio se confirma que cuando ocurre una falla o que cuando se presentan distintas perturbaciones en el sistema el STATCOM tiene una respuesta mucho mejor a lo que se obtiene con el SVC.

De igual manera, con un propósito comparativo se añaden tablas que muestran un breve resumen detallado de costos estimados, mostrando todas y cada una de las especificaciones para la implementación de cada compensador.

Pero sin duda, el logro primordial que se ha obtenido es evidenciar la eficacia que tienen los compensadores FACTS, en particular los dispositivos aquí estudiados, demuestran que son una alternativa a métodos convencionales de compensación para el mejoramiento de los sistemas eléctricos y permitir que estos puedan ser explotados al máximo reforzando la construcción de líneas de transmisión y/o plantas de generación. Por otro lado también incrementa de manera indirecta la fiabilidad de los sistemas de transmisión.

Como otro logro a mencionar es la elaboración y presentación de documentos técnicos en congresos o revistas, que se espera emane de los resultados obtenidos del presente trabajo de investigación destacando,

- “*Estudio Comparativo Técnico-Económico de Controladores FACTS en Conexión Paralelo*”. A ser enviado a la revista *Ingeniería Investigación y Tecnología*. Publicada por la Facultad de Ingeniería de la UNAM

## **1.6 Descripción del Contenido.**

El presente trabajo de tesis se encuentra distribuido en 6 Capítulos que comprenden la descripción, modelado y análisis de todas y cada una de las funciones de dichos controladores, las simulaciones y los resultados obtenidos.

El Capítulo I introduce el tema y describe objetivos, metodología y logros del proyecto de tesis.

El Capítulo II, da una descripción general de los controladores FACTS, como son sus principios básicos de operación y sus características técnicas, así como todas las consideraciones que se tienen que hacer para su implementación en un sistema eléctrico de potencia.

En el Capítulo III, muestra a detalle el principio básico de operación del controlador SVC, los elementos que lo conforman y sus curvas características de operación.

El Capítulo IV presenta el principio básico y curvas características de operación así como los elementos que conforman al controlador STATCOM.

En el Capítulo V se realiza un análisis puntual y comparativo sobre las cualidades técnicas y económicas de los controladores en estudio.

El Capítulo VI incluye las conclusiones y un panorama con visión a trabajo futuro.