



# SISTEMAS DE TRANSMISIÓN FLEXIBLE EN CORRIENTE ALTERNA - FACTS

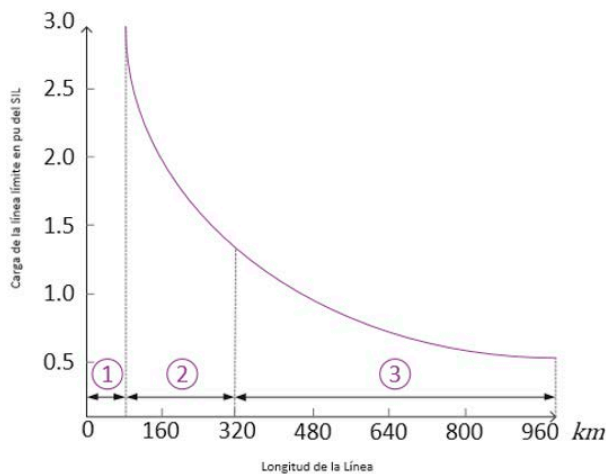


Ing. Gonzalo Oscar Eulate Choque • CIEE - La Paz

## CARGABILIDAD LÍNEAS DE TRANSM.

El flujo de potencia es limitado y tienen preponderancia en función de la longitud.

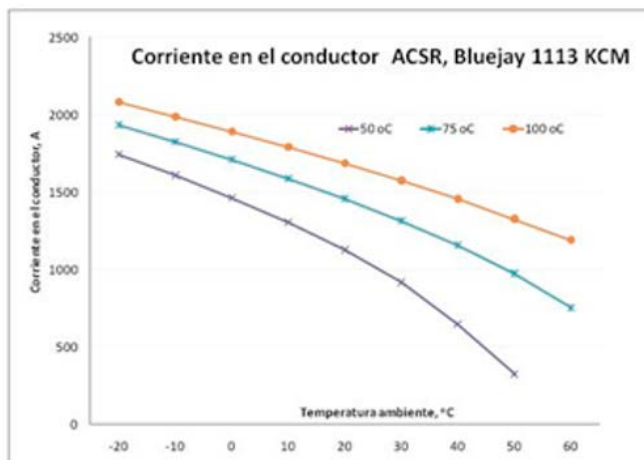
La cargabilidad de las líneas puede resultar determinada por la capacidad térmica de los conductores, por la caída de voltaje entre sus nodos o por límites de potencia establecidos por estabilidad.



- 1) Longitudes de línea entre 0 a 80 km      imperan límites térmicos
- 2) Longitudes de línea entre 80 a 320 km      impera la regulación de voltaje
- 3) Longitudes de línea sobre 320 km      impera los límites de estabilidad

## LÍMITE TÉRMICO

El límite térmico de un conductor para líneas aéreas es la corriente máxima permitida, considerando una temperatura máxima a través del conductor para condiciones ambientales establecidas.



Fuente: Artículo Determinación de límites de transmisión en sistemas eléctricos de potencia ingeniería, investigación y tecnología ISSN 1405-7743.

Efecto en la corriente del conductor Bluejay 1113 para temperaturas de operación 50, 75 y 100 °C, ante variaciones de las condiciones ambientales.

## LÍMITE REGULACIÓN DE VOLTAJE

La cargabilidad de una línea de transmisión indica la capacidad de potencia que puede fluir por la línea bajo condiciones de operación aceptables. La cargabilidad de la línea está en función del calibre y la longitud de la línea.

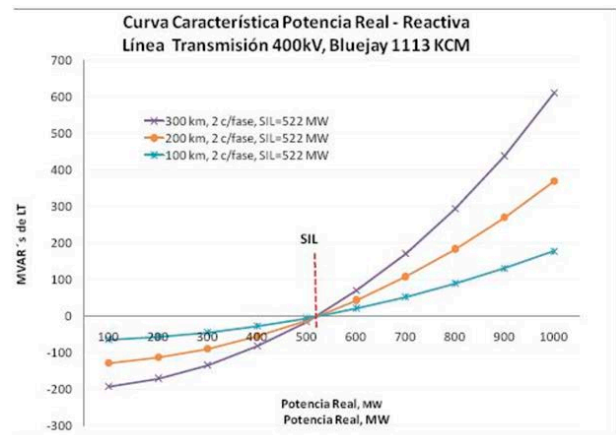
La cargabilidad de una línea puede valorarse a partir de la relación del flujo de potencia real contra potencia reactiva (P-Q) a través de la línea eléctrica.

El valor de la potencia real donde el requerimiento de potencia reactiva es cero se conoce como SIL Surge Impedance Loading o potencia natural de la línea (Kundur, 1994; Duncan, 1990). El valor del SIL depende tanto de la inductancia serie y la capacitancia en derivación como del nivel de tensión entre fases de la línea de transmisión, como se indica en la ecuación.

$$Z_c = \sqrt{L/C} \quad SIL = \frac{kV_{L-L}^2}{\sqrt{L/C}}$$

La impedancia natural de carga (SIL= surge impedance loading) se define como la potencia entregada por la línea a una resistencia pura igual a la impedancia natural.

## POTENCIA NATURAL SIL

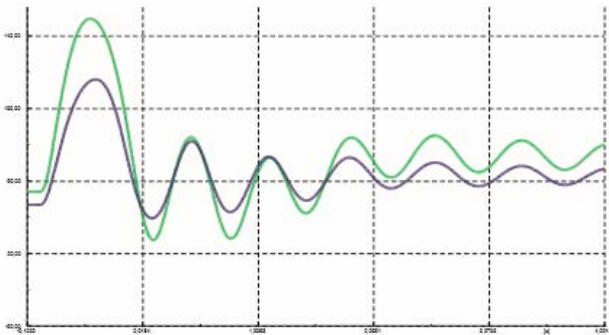


Fuente: Artículo Determinación de límites de transmisión en sistemas eléctricos de potencia ingeniería, investigación y tecnología ISSN 1405-7743.

Curva característica potencia real – potencias reactiva para varias longitudes de una línea de 400 kV, un circuito, un cable ACSR Bluejay 1113 KCM con dos conductores por fase.

## LÍMITE DE ESTABILIDAD

Los problemas de estabilidad pueden ser provocados por cambios de carga, cierre o apertura de líneas, por despacho de generación o por disturbios eléctricos. Con la finalidad de prevenir estados inestables se limita la capacidad de transmisión a través de sus vínculos. La tecnología FACTS puede ser utilizado para ampliar los límites de transferencia por estabilidad.



Fuente: proyecto de grado Santiago Xavier Santana Alarcón Ecuador

Respuesta del Ángulo del rotor ante una perturbación. Caso estable.

## LÍMITES DE TRANSMISIÓN REGIMEN PERMANENTE

En una línea sin pérdidas, la potencia está determinada por X (Longitud)

$$P = \frac{V^2}{X}$$

Pérdidas por efecto Joule (Límite Térmico, Líneas Cortas)

$$P = I^2 R$$

$$\frac{X}{R} < 5$$

Caída de Tensión (Líneas Medias)

Estabilidad (Líneas Largas)

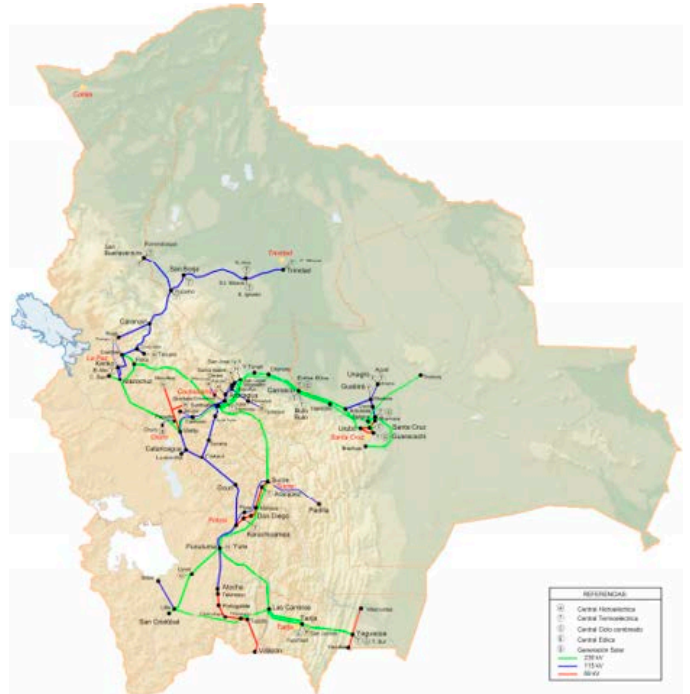
Flujos en líneas paralelas

Rango de operación de Tensión  $\pm 5\%$  ,  $\pm 10\%$

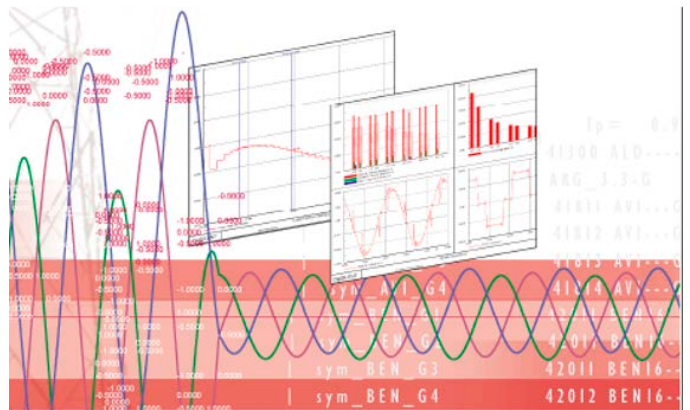
## SOFTWARE UTILIZADO

En Bolivia en CNDC actualiza la base de datos referida al SIN de forma semestral en el software DIGSILENT PowerFactory.

Este programa permite además del calculo de flujos de potencia, cortocircuito, etc. También brinda la opción de programar mediante DPL y crear diagramas de control con DSL.



## PROGRAMACIÓN EN DPL Digsilent Language Programming PROGRAMACIÓN EN DSL Digsilent Simulation Language



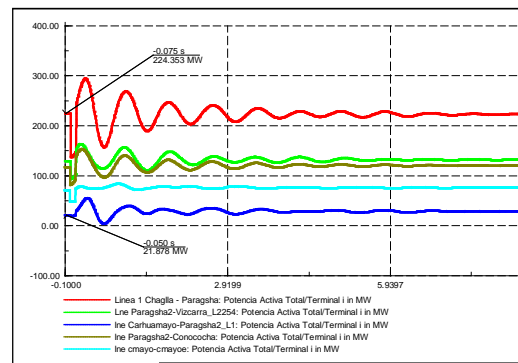
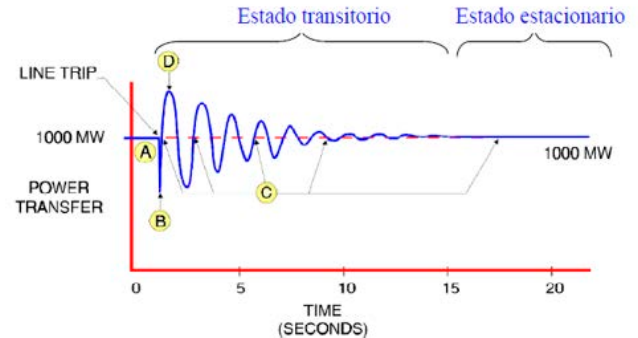
## DPL DIGSILENT PROGRAMMING LANGUAGE

El lenguaje de programación Digsilent DPL ofrece una interfaz para el usuario, para la automatización de tareas en PowerFactory (Script).

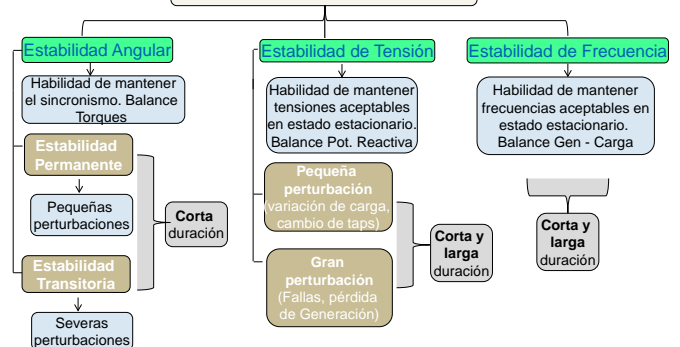
El objeto de comando DPL ComDpl es el elemento central, que conecta diferentes parámetros, variables u objetos a varias funciones o elementos internos y luego genera resultados o cambia parámetros.

## ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA

Es la habilidad que tiene un SEP para permanecer o recuperar un estado de equilibrio aceptable después de haber sido sometido a una perturbación, de tal modo que todas las variables de sistema permanezcan intactas.



### Estabilidad de Sistemas de Potencia



## NECESIDAD DE COMPENSACIÓN

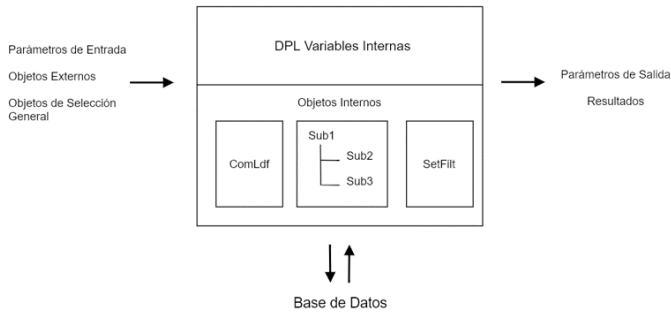
Líneas de Transmisión, limitaciones en la transferencia de potencia, derecho de vía, etc.

Generación No Convencional, paneles solares, generación eólica.

Cambios Regulatorios, calidad de servicio técnico.

## SISTEMAS DE TRANSMISIÓN FLEXIBLE EN CORRIENTE ALTERNA - FACTS

Conjunto de dispositivos basados en electrónica de potencia, que permiten modificar parámetros que regulan la transmisión de potencia eléctrica.



## DIGSILENT SIMULATION LANGUAGE DSL

- DSL puede describir:
  - ✓ Cualquier sistema lineal o no lineal de Ecuaciones Diferenciales
  - ✓ Tiempo muerto (Ej. Ecuaciones de onda ideal).
  - ✓ Cualquier ecuación aritmética o lógica (Ej. Controladores digitales).
  - ✓ Cualquier evento (Ej. Apertura de interruptor si  $x > y$ ).
- DSL puede ser usado para:
  - ✓ Escribir un programa DSL.
  - ✓ Dibujar un diagrama de bloques.
  - ✓ Combinación de ambas.

## MODELOS DINÁMICOS - DSL

Procedimiento General creación de modelos dinámicos

1. Considere la estructura del sistema a modelar y cómo se puede dividir en bloques discretos que se pueden modelar por separado.
2. Generación de un Frame que muestre las interconexiones de los Slot's.
3. Generar los diferentes "model definitions" y se debe establecer las condiciones iniciales.
4. Generar un "composite model" y llenar los Slot's con los diferentes elementos, modelos integrados, dispositivos de medición, etc.
5. Prueba del modelo completo.

## VARIABLES DSL

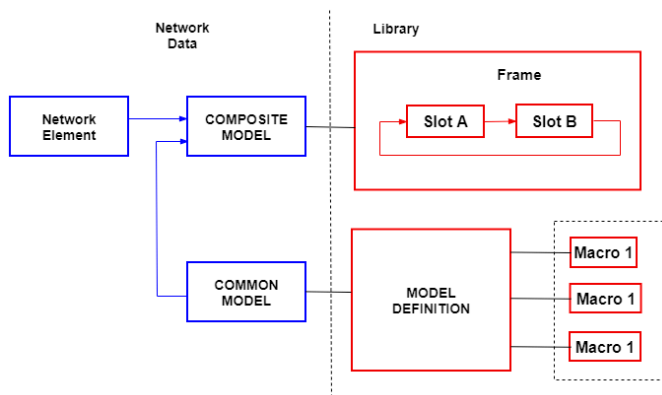
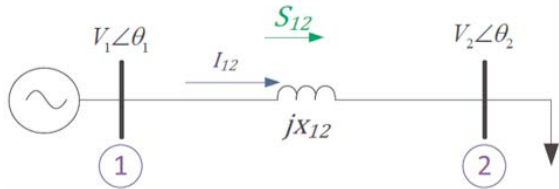


Diagrama de un "model definition"



## TIPOS COMPENSACIÓN - FACTS

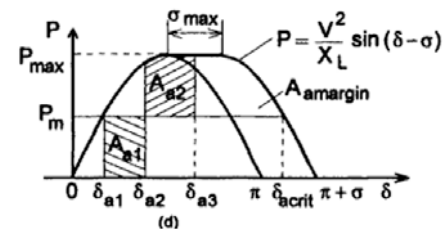
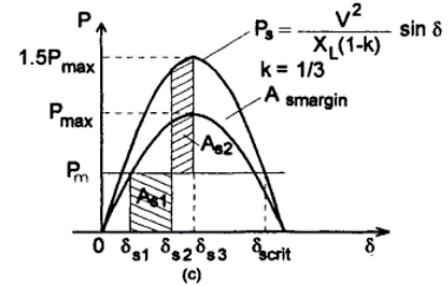
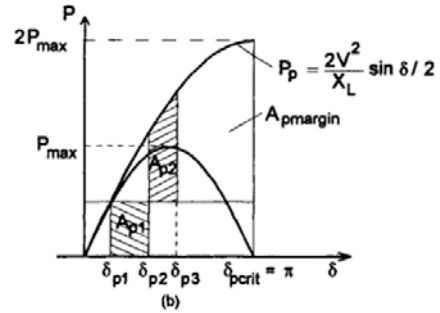
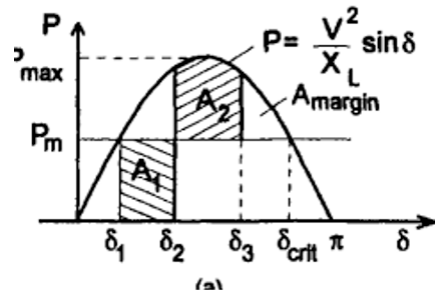
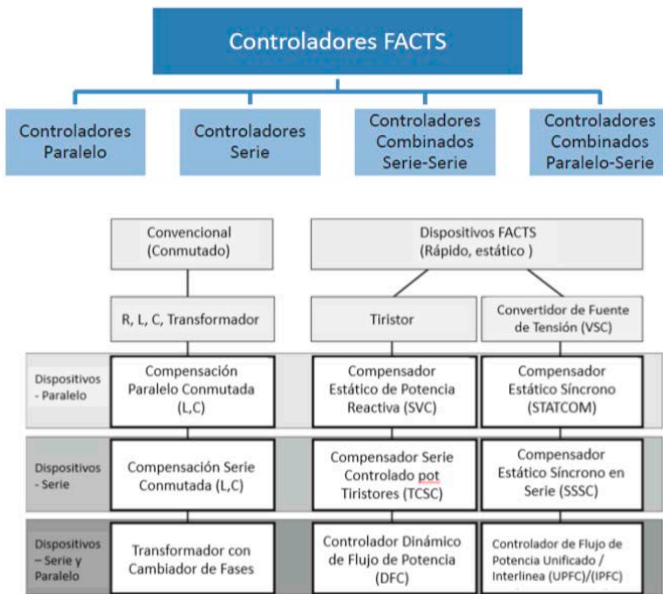


$$P_{12} = \frac{V_1 \cdot V_2}{X_{12}} \text{sen } \theta_{12} \quad Q_{12} = \frac{V_1(V_1 - V_2 \cos \theta_{12})}{X_{12}}$$

### VENTAJAS - FACTS

- ✓ Control de flujo de potencia
- ✓ Incremento de la capacidad de transmisión
- ✓ Control de voltaje
- ✓ Compensación de energía reactiva
- ✓ Mejoras de estabilidad
- ✓ Mejoras de calidad de potencia
- ✓ Mejoras de calidad de suministro
- ✓ Mitigación del efecto flicker
- ✓ Interconexión de energía renovable y distribuida

### TIPOS - FACTS



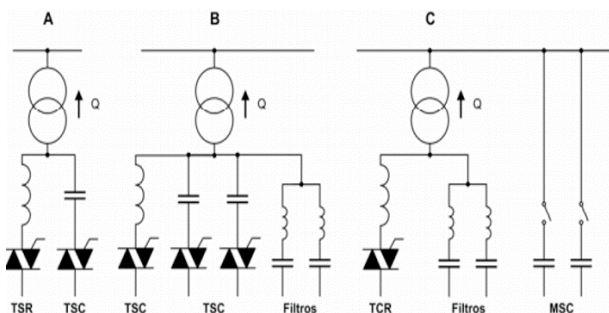
- a) Sin Compensación
- b) Compensación Shunt
- c) Compensación Serie
- d) Compensación de ángulo

Fuente: *Presentación Ing. José Salazar*

Fuente: *proyecto de grado Santiago Xavier Santana Alarcón Ecuador*

Dispositivos FACTS y convencionales

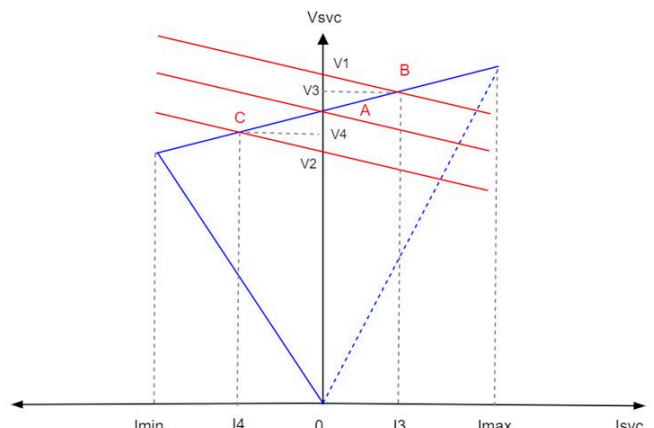
### SVC - FACTS

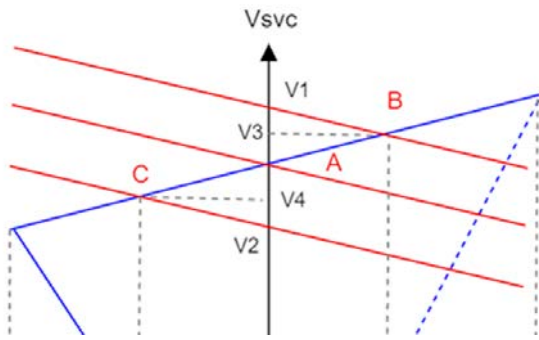


Fuente: *proyecto de grado Santiago Xavier Santana Alarcón Ecuador*

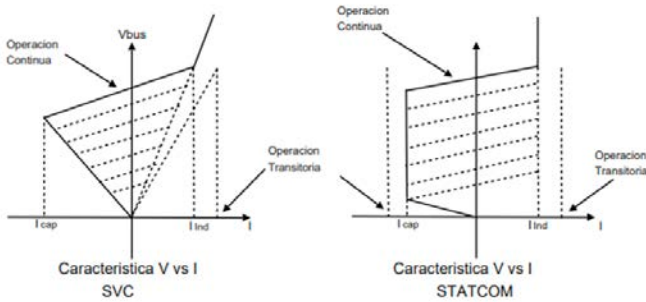
### FACTS

### Características del SVC y el SEP



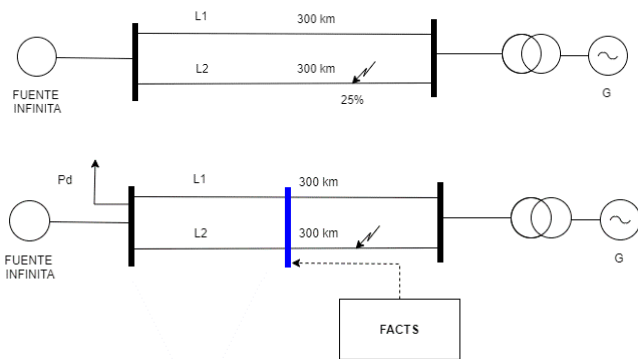


### Características del SVC - STATCOM



Fuente: Trabajo de grado COMPENSADOR ESTÁTICO SÍNCRONO (STATCOM) MODELACIÓN Y SIMULACIÓN, Edgar Enrique Sierra Rodríguez.

### SISTEMA GENERADOR BARRA INFINITA



Análisis de estabilidad transitoria en un SMBI. El bus o barra infinita es una idealización de un sistema de potencia.

Es tan grande que en la barra no varían ni el voltaje ni la frecuencia, siendo inmaterial la magnitud de las potencias activas o reactivas que se toman o suministran a él.

### ESTABILIDAD ANGULAR

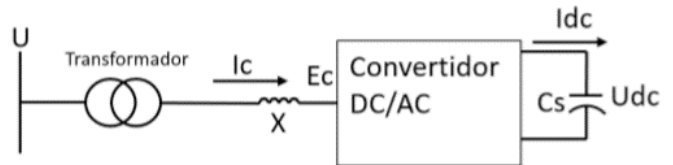
Conocido como estabilidad del ángulo del rotor, es la habilidad de los generadores síncronos de un SEP para mantenerse en sincronismo después de haber sido sometido a una perturbación. Consiste en mantener el equilibrio entre el par electromagnético y el par mecánico.

**Estabilidad Permanente:** Capacidad del SEP de mantener el sincronismo ante pequeñas perturbaciones durante su operación.

**Estabilidad Transitoria:** Capacidad del SEP de mantener el sincronismo cuando es sometido a severas perturbaciones (generando grandes cambios en los ángulos del rotor).

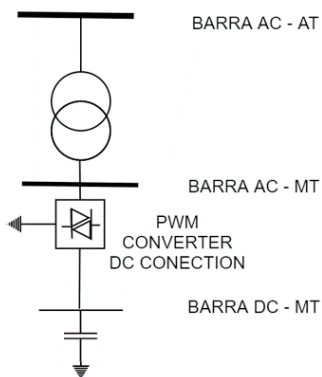
### MODELACIÓN STATCOM

#### Esquema del STATCOM



Fuente: proyecto de grado Santiago Xavier Santana Alarcón Ecuador

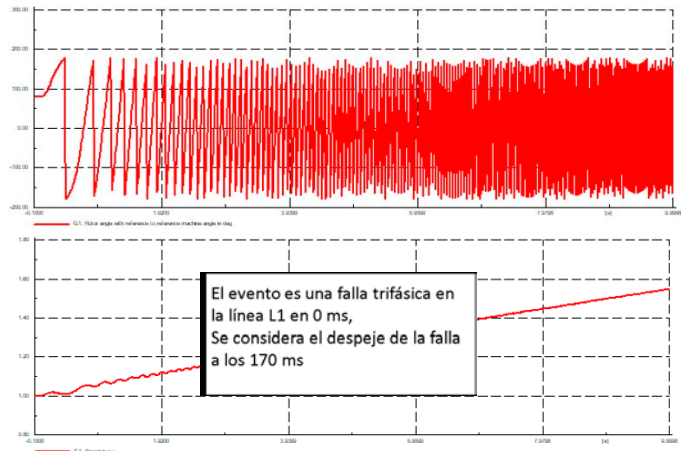
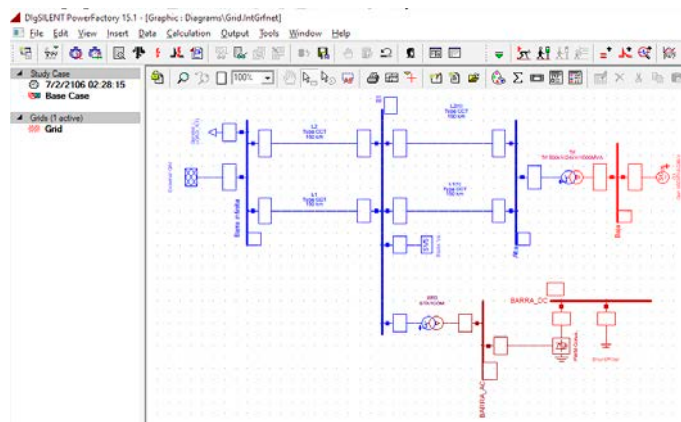
El principio de funcionamiento de un STATCOM (compensador estático síncrono) se basa en un inversor de voltaje que genera un voltaje de AC controlable desde atrás de la reactancia de dispersión del transformador logrando, de este modo, que la diferencia de tensión a través de la reactancia produzca intercambio de potencia activa y reactiva con la Red de transmisión.



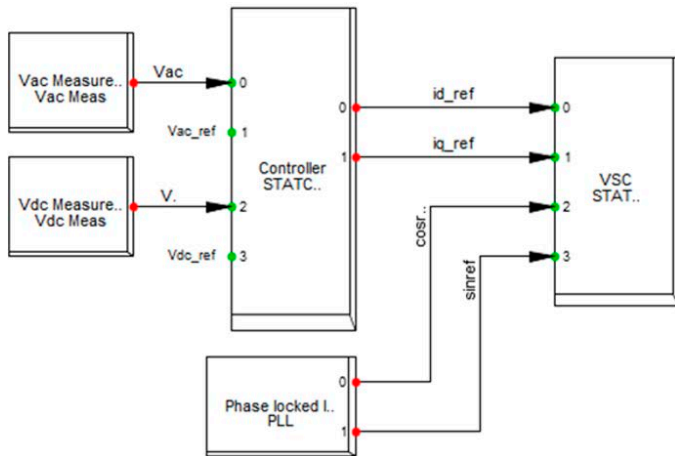
Modelación en el Digsilent

### Parámetros de Control

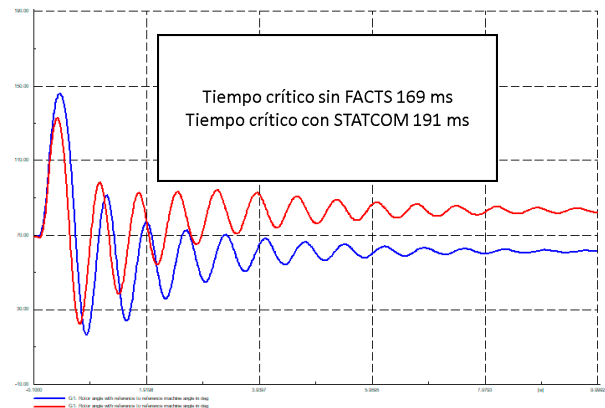
Parameter	Value
Kp Active Power Control Gain [p.u.]	20
Tp Active Power Control Time Constant [s]	0.01
Kv Voltage Control Gain [p.u.]	1
Tv Voltage Power Control Time Constant [s]	0.01
droop	0
Trdc	0.005
Trac	0.005
L_min	-1.2
L_max	1.2



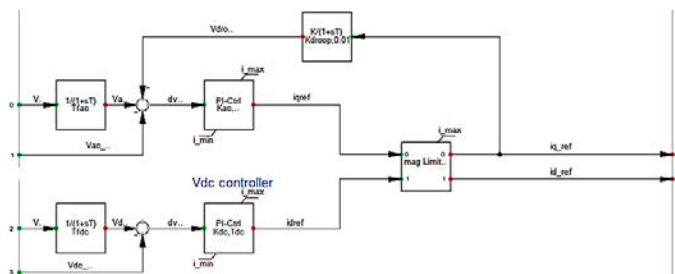
### Modelo Compuesto



### Angulo del rotor y velocidad en p.u.



### Controlador STATCOM



### Angulo del rotor, color rojo con SVC, color azul con STATCOM

## ESTABILIDAD DE TENSIÓN

La habilidad del sistema de potencia de mantener los voltajes de estado estable en todas las barras del sistema después de haber sido sujeto a un disturbio desde una condición IEEE/CIGRE.

El término Colapso de tensión se usa a menudo, y es el proceso por el cual la secuencia de eventos que acompañan a la inestabilidad de tensión conduce a un apagón o tensiones bajas anormales en una parte significativa del sistema de potencia.

### Métodos de Análisis de Estabilidad de Tensión

- ✓ Método de Análisis de Sensibilidad V-Q
- ✓ Método de Análisis Modal
- ✓ Método Curvas P-V
- ✓ Método Curvas V-Q

## MODULACIÓN POR ANCHURA DE PULSO

### Variantes

- ✓ Un único pulso por semiperiodo
- ✓ Varios pulsos por semiperiodo
- ✓ Varios pulsos con referencia senoidal
- ✓ No se adapta bien a la respuesta dinámica de cargas no lineales
- ✓ Poseen elevadas pérdidas por conmutación
- ✓ Puede existir problemas de armónicos

## ANÁLISIS DE ESTABILIDAD



## FACTS

### Características del SVC y el SEP

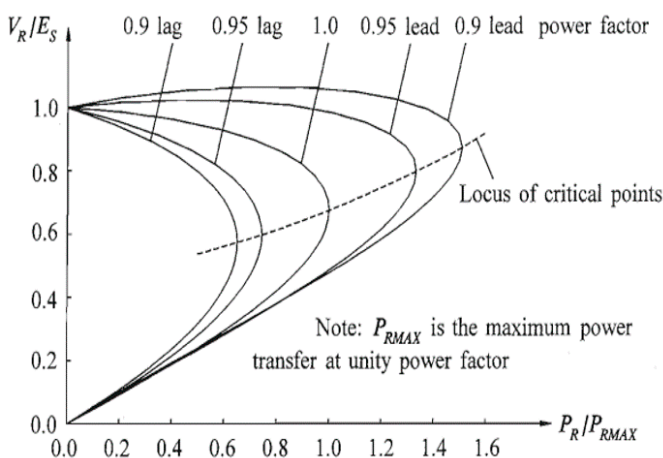
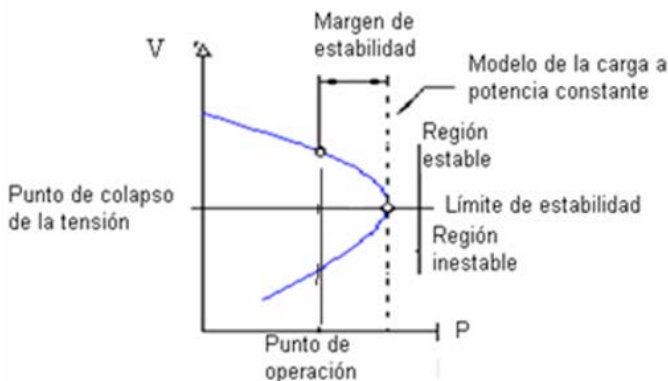
Análisis de la estabilidad de voltaje por medio de las curvas P-V, Q-V. Estas curvas muestran la sensibilidad y variación del voltaje en un nodo con respecto a la inyección o absorción de potencia reactiva en el mismo nodo.

Son útiles para examinar los requerimientos de compensación de reactivo en los sistemas de potencia. El punto donde la derivada de Q con respecto a V es cero representa el límite de estabilidad de voltaje, el cual define la mínima potencia reactiva requerida para una operación estable del sistema.

### ESTABILIDAD DE TENSIÓN

La curva potencia activa-tensión, se utiliza para determinar el límite de estabilidad de tensión en estado estacionario de un sistema de potencia, a partir de la distancia en MW desde el punto de operación al punto de tensión crítica.

También se puede observar que existen dos regiones una es la de la tensión estable y la otra es de la de la tensión inestable.



## CASO YUNCHARÁ TARIJA

### Modelado de un STATCOM para Análisis de estabilidad en la Central de generación Fotovoltaica de la región De Yunchará - Tarija



*Gonzalo Oscar Enlate Choque  
Cristhian Coyo Llanque*

En Bolivia, se encuentra en proceso del cambio de la Matriz Energética, incremento de la generación ENERGÍAS ALTERNATIVAS.

QOLLPANA	27 MW
COBIJA	5.2 MW
UYUNI	60 MW
ORURO	50 MW (* en construcción)
YUNCHARÁ	5 MW
UMSA	50 kW
DMAX	1511 MW (27 SEP)

La energía eléctrica tiene 2 componentes:

Potencia Activa MW  
Potencia Reactiva MVar

Para una correcta operación en el SIN, de las fuentes de Energías Alternativas, se requiere la incorporación de potencia reactiva.

Una alternativa, es el uso de Compensadores Síncronos STATCOM (objeto del estudio).

- ✓ Dimensionar el tamaño del compensador estático síncrono.
- ✓ Análisis en estado de régimen.
- ✓ Análisis en estado transitorio.
- ✓ Análisis N-1 en estado transitorio.

## VENTAJAS Y DESVENTAJAS PANELES FV

### Ventajas:

- ✓ Fuente de energía primaria ilimitada
- ✓ Costos de mantenimiento y operación bajos
- ✓ Mínimo impacto ambiental

### Desventajas

- Elevado costo de implementación
- Inestabilidad ante variaciones de radiación solar.
- Costo elevado de dispositivos de almacenamiento

### STATCOM

- ✓ Mejoras en la seguridad y confiabilidad.
- ✓ Compensación de energía reactiva
- ✓ Mejoras de estabilidad permanente y transitoria.
- ✓ Interconexión flexible de generación renovable y distribuida

## IMPLEMENTACIÓN EN EL SIN

Se implementa el STATCOM en la central fotovoltaica en la región de Yunchará – Tarija.

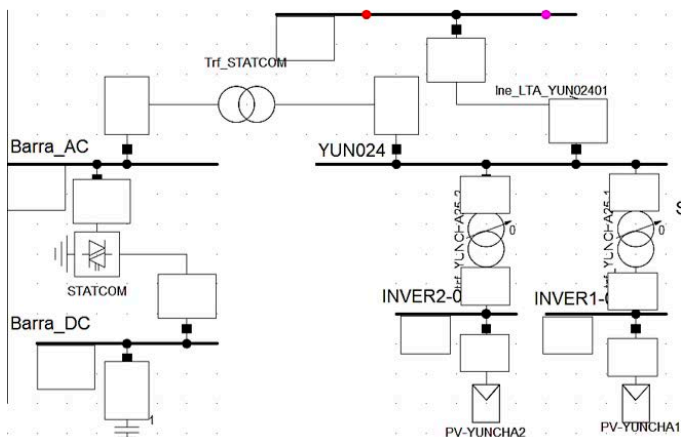
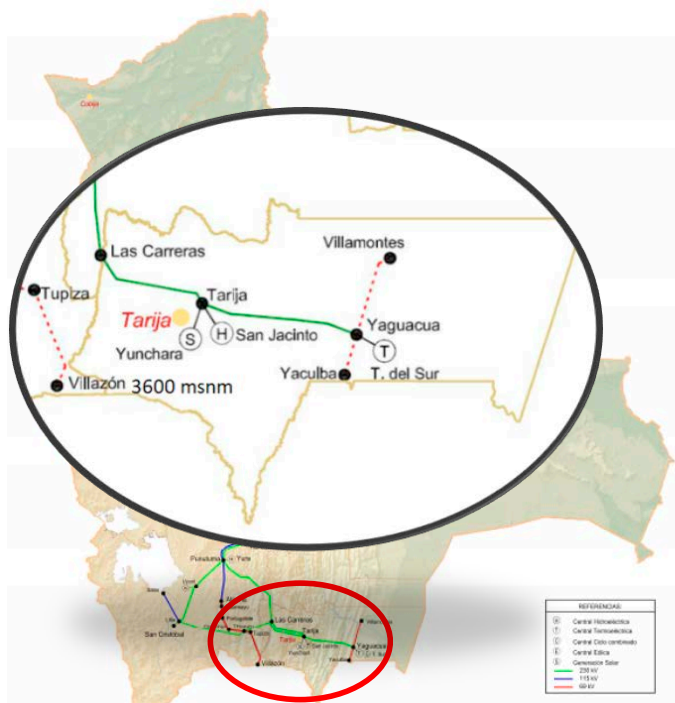


Diagrama unifilar del área de estudio



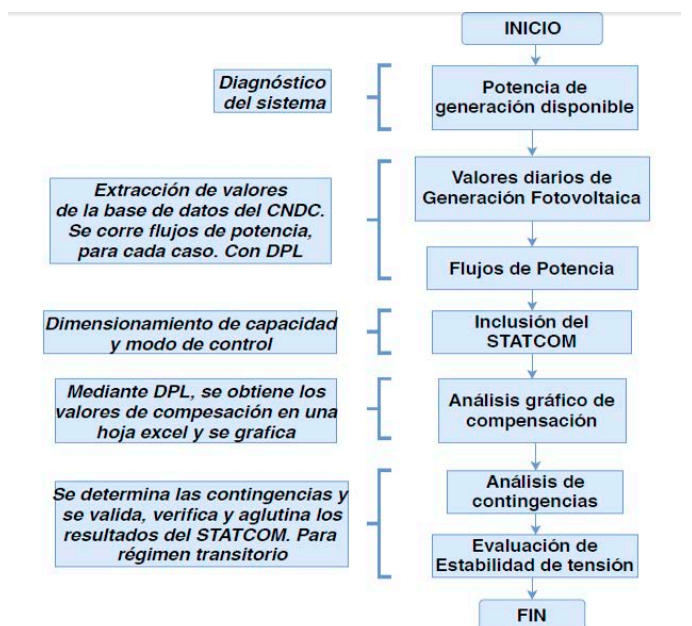
- Se utiliza la base de datos del Comité Nacional de Despacho de Carga CNDC.
- Se determina la capacidad de compensación por datos del CNDC, para el STATCOM que es de 2.4 [MVA], se realiza el análisis mediante script (DPL) en el software DIgSILENT.
- Se realiza el estudio de estabilidad de tensión tanto en régimen permanente como en régimen transitorio.
- Para el análisis de estabilidad de frecuencia, se debe tener una penetración fotovoltaica mayor a 50 MW. Por lo tanto no se realiza este estudio.

## ANÁLISIS EN REGIMEN PERMANENTE

Con los datos de generación diaria de la central FV, se realiza el análisis de flujos de potencia.

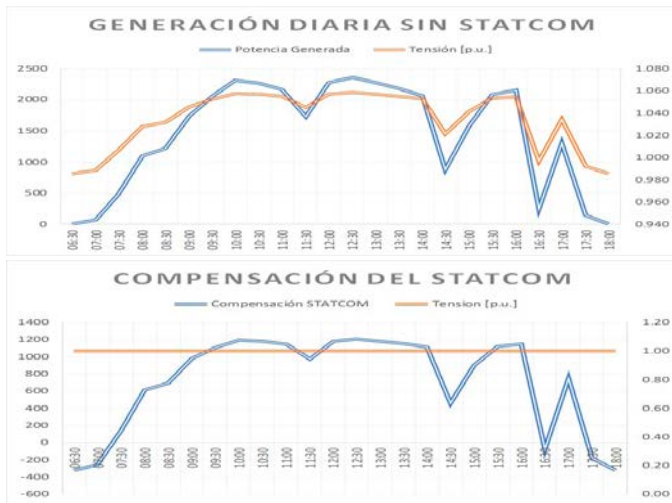


## PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS



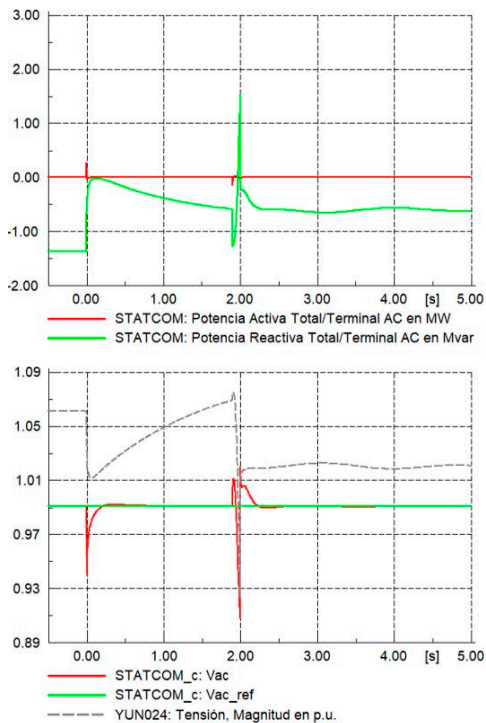


## RESULTADOS FLUJOS DE POTENCIA



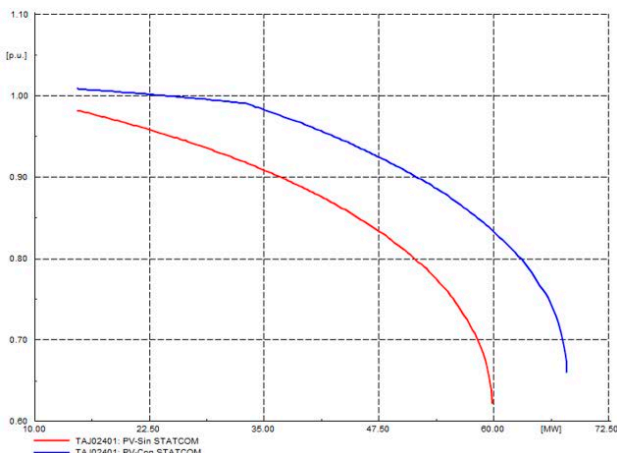
## ANÁLISIS DINÁMICO

Salida de servicio de las líneas VAV024 y SAJ024, mediante método N-1.



## CURVA PV

Análisis de la variación de potencia – tensión NODO TARIJA 24.9 kV



## CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra la posibilidad de incorporar los dispositivos FATCS en líneas de gran longitud encauzados a mejorar la estabilidad transitoria.

En el caso de Yunchará se obtuvo la compensación de 2.4 MVAR, se tiene conocimiento de que se dimensionó en 2.8 MVAR.

El software utilizado permite análisis de estabilidad transitoria, de voltaje, simulación de eventos en forma automática (DPL, DSL).

Se recomienda continuar con estudios de estabilidad ante la presencia de generación solar y eólica.

## AUTOR



### GONZALO OSCAR EULATE CHOQUE

Ingeniero Electricista, Magister Sc en Ingeniería del Software, Docente Universidad Mayor de San Andrés, Docente Ingeniería Eléctrica de la Universidad Mayor de San Andrés, áreas de interés: Regulación de Electricidad, Inteligencia Artificial, Sistemas Eléctricos de Distribución, Sistemas Eléctricos de Potencia, Member IEEE. Estudios de Postgrado en Administración de Empresas, Planificación, Protección de Redes de Distribución, Métodos Numéricos de la Simulación y Modelación, Análisis de los Regímenes de las Redes de Distribución, Economía Informática, Ingeniería del Software.

Página web: <http://geulate.okicode.com>

Email: [geulate@gmail.com](mailto:geulate@gmail.com)