

Amortiguamiento de oscilaciones mediante FACTS para prevención de apagones

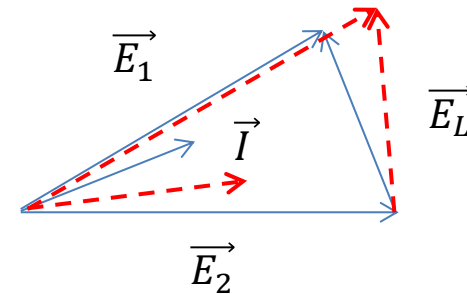
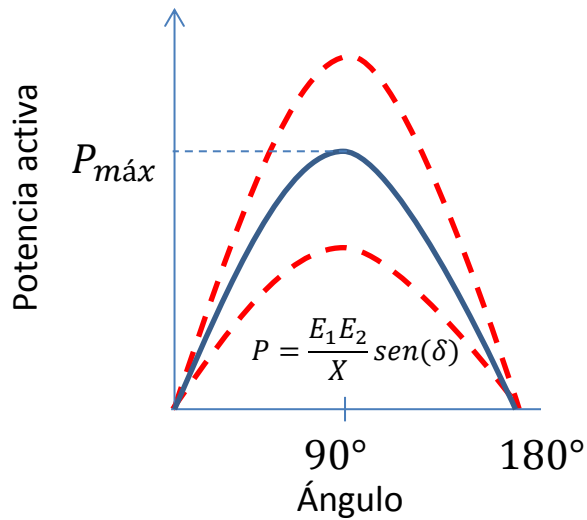
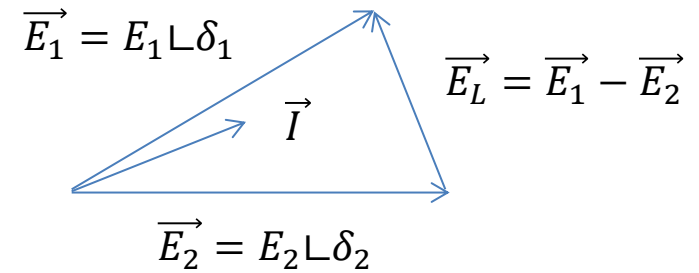
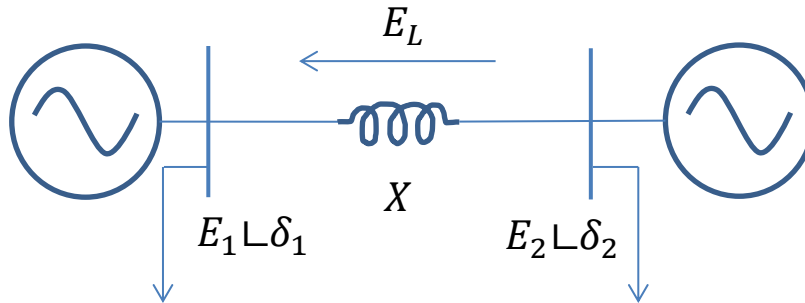
Camilo Andrés Ordóñez Medina, MSc.
Gerencia de Planeación y Nuevos Negocios

Jornadas Técnicas de Transmisión
Agosto 26 de 2015

Contenido

1. Transmisión AC flexible
 - 1.1 Sistemas de transmisión flexible AC: FACTS
 - 1.2 Impacto de los FACTS en el sistema
2. FACTS tipo shunt o paralelo
 - 2.1 Impacto en la estabilidad de voltaje
 - 2.2 Impacto en la estabilidad transitoria
 - 2.3. Amortiguamiento de oscilaciones de potencia
3. Static Var Compensator (SVC)
4. SVC de Tunal 230 kV
 - 4.1 Amortiguador de oscilaciones de potencia (POD)
 - 4.2 Modificación de modos de oscilación gracias al POD
 - 4.3 SVC de Tunal durante un evento real
 - 4.4 Comportamiento SVC durante Junio 2015
5. Conclusiones
6. Referencias

1. Transmisión AC flexible

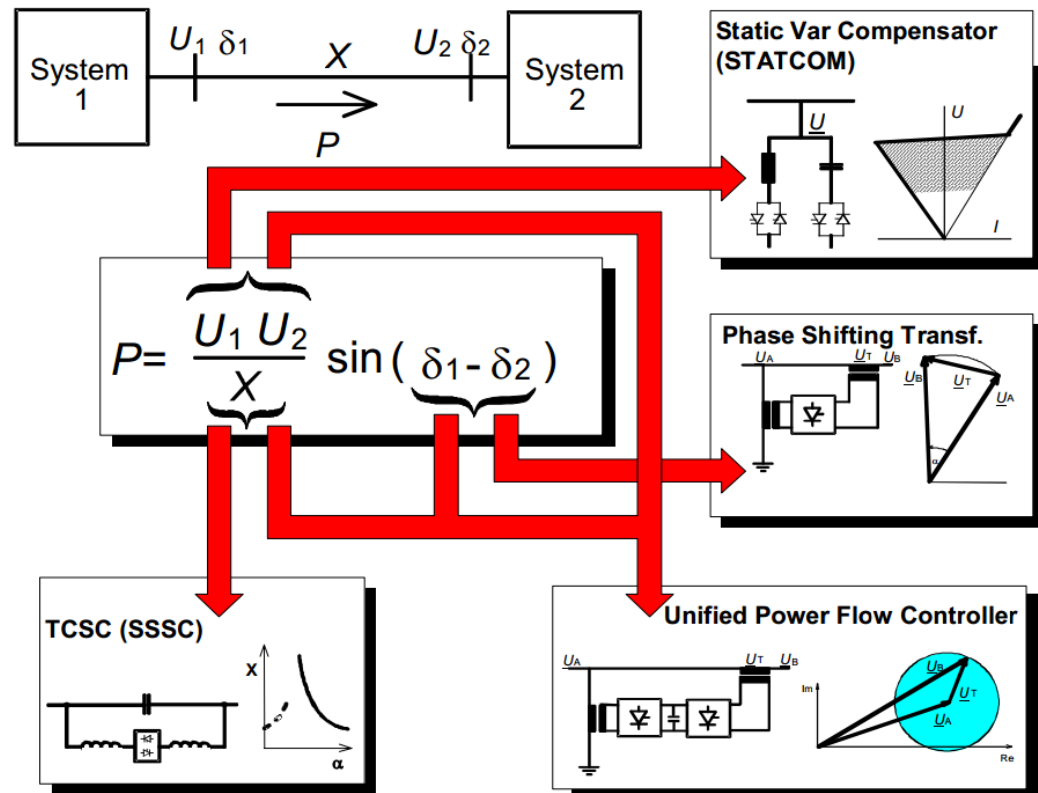


— Fasores modificados

1.1 Sistemas de transmisión flexible AC FACTS

Beneficios

- ✓ Se mejoran cargabilidades y se da un uso más eficiente de los corredores de transmisión
- ✓ Control de flujo de potencia
- ✓ Estabilidad del sistema
- ✓ Seguridad del sistema
- ✓ Confiabilidad del sistema
- ✓ Flexibilidad para las nuevas gen. & dist.
- ✓ Calidad de suministro a industrias sensibles
- ✓ Ambiental: mejor utilización de activos existentes (se pospone la necesidad de nuevas líneas)



Tomado de H. K. Tyll, SM IEEE. FACTS Technology for Reactive Power Compensation and System Control

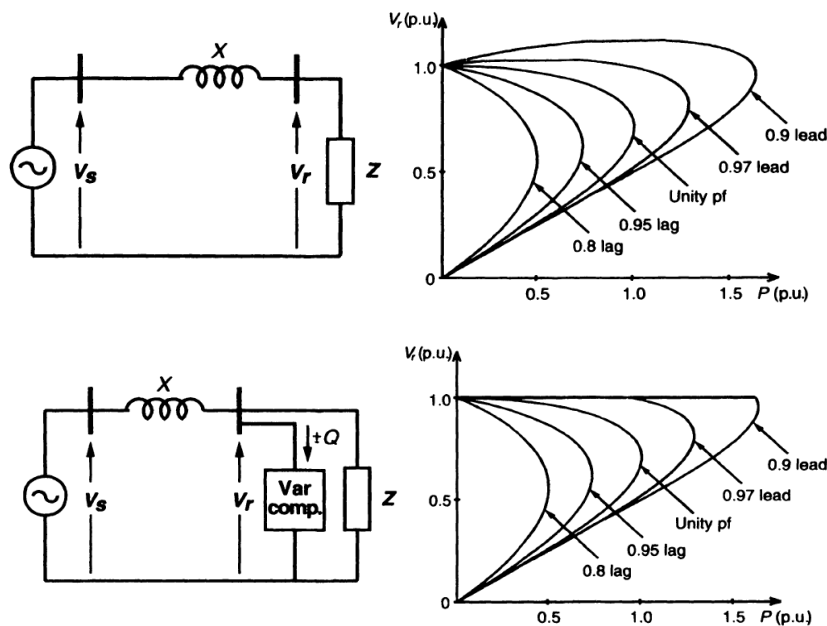
1.2 Impacto de los FACTS en el sistema

Nombre del FACTS	Control de tensión	Mejora estabilidad	Control de potencia
Compensador estático de VAr (SVC)	X	X	
Compensador síncrono estático (SSC)	X	X	
Compensador estático (STATCOM)	X	X	
Compensador Serie controlado por Tiristores (TCSC)		X	X
Controlador Unificado de Flujo de Potencia (UPFC)	X	X	X

 Controlar la tensión para mejorar la estabilidad conlleva a incrementar la seguridad del sistema, lo que a su vez implica la disminución del riesgo de un colapso o apagón local o general 

En el área Oriental del STN colombiano, en 2015 habrá conectado un SVC en Tunal 230 kV (entró en operación en Noviembre de 2014) y un STATCOM en Bacatá 500 kV

2.1 FACTS tipo shunt: impacto en la estabilidad de voltaje



Tomado de Hingorani. Understanding FACTS.

Arriba: carga conectada al final de sistema radial
Abajo: La misma carga conectada + compensador variable en paralelo

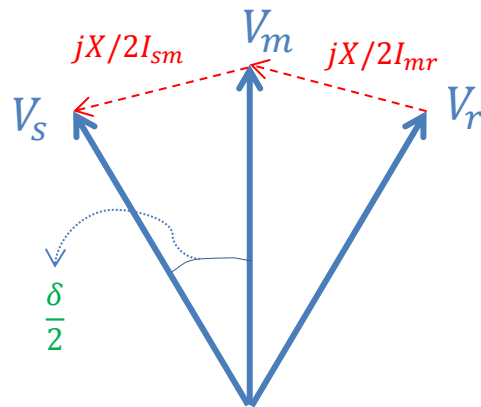
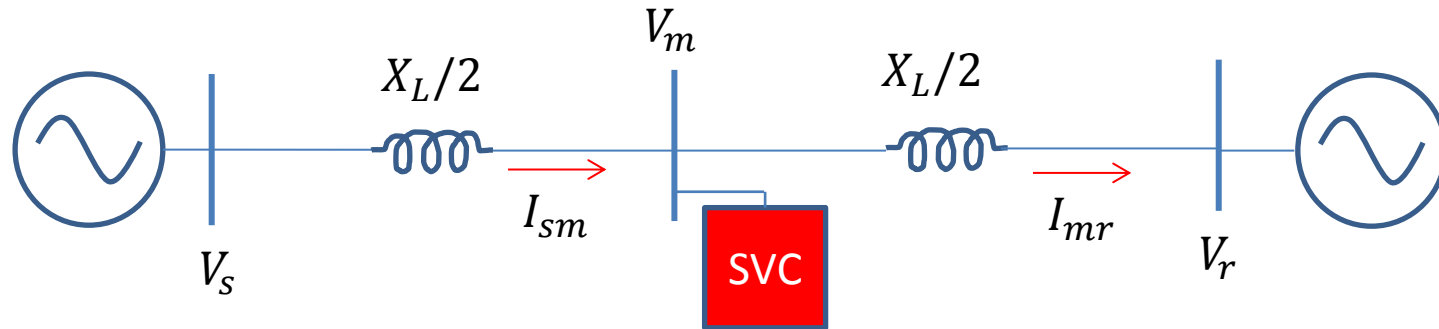
Pérdida de generación en un área de alta cargabilidad

Incremento repentino de importación y/o generación local

Depresiones de voltaje que podrían resultar en un colapso.

Inyección dinámica de potencia reactiva reduce este riesgo !!

2.2 FACTS tipo shunt: impacto en la estabilidad transitoria



$$|V_s| = |V_m| = |V_r| = V$$

$$\Delta V = V_m - V_r = V(1 - 1 \angle -\delta/2)$$

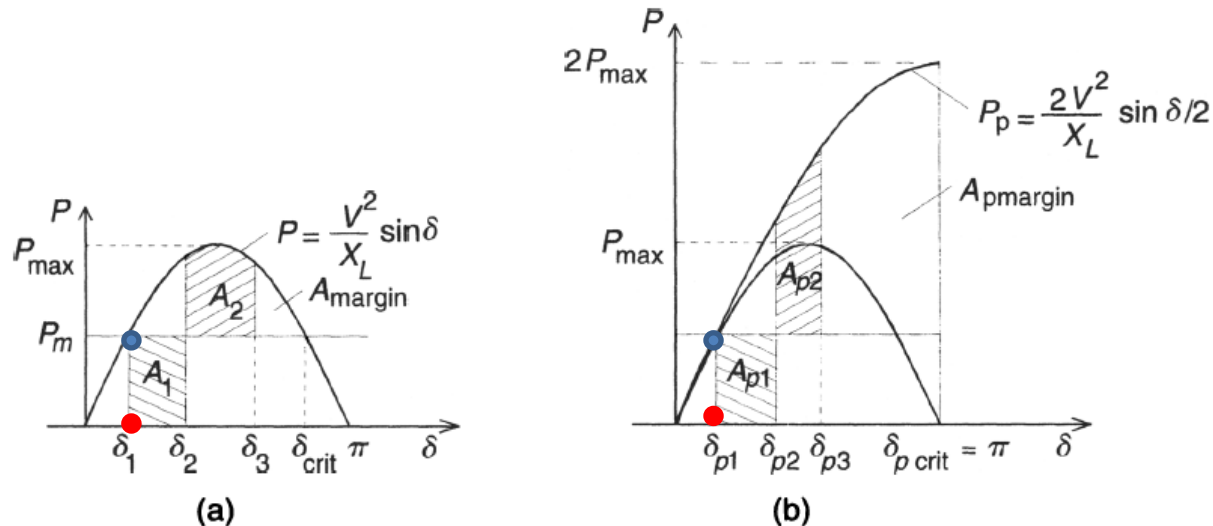
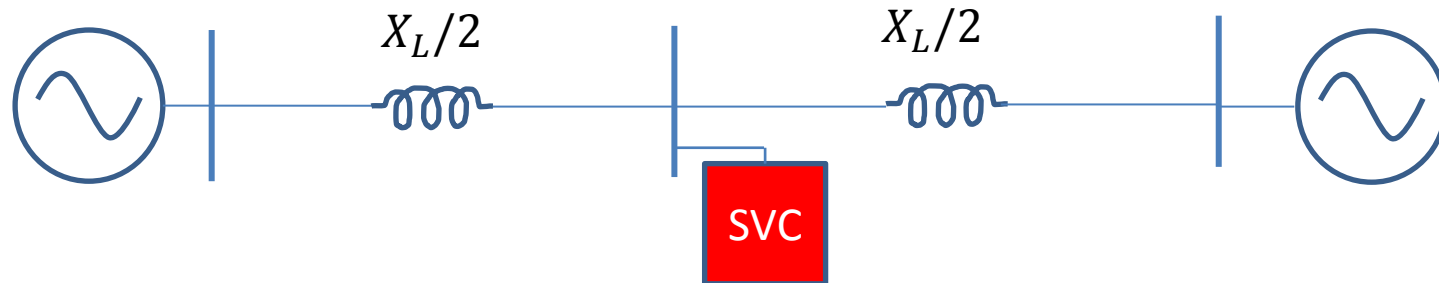
$$I_{mr} = I = \frac{\Delta V}{\frac{jX}{2}} = \frac{2\Delta V}{jX}$$

$$S = VI^* = \frac{2V^2}{X} \left(-j + j \angle \frac{-\delta}{2} \right)^*$$

$$P = \frac{2V^2}{X} \sin \frac{\delta}{2} \quad Q = \frac{2V^2}{X} \left(1 - \cos \frac{\delta}{2} \right)$$

Tomado de Hingorani. Understanding FACTS.

2.2 FACTS tipo shunt: impacto en la estabilidad transitoria

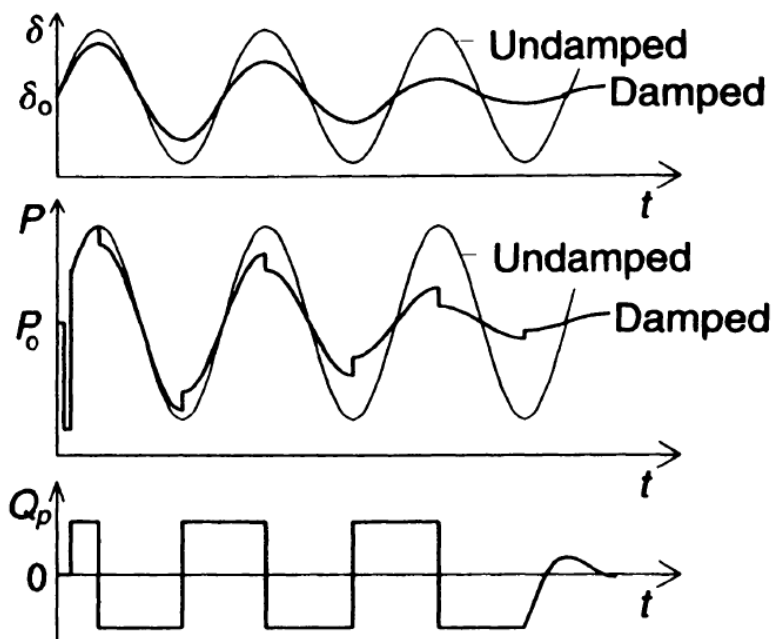


Tomado de Hingorani. Understanding FACTS.

Criterio de áreas iguales para ilustrar el margen de estabilidad en un sistema simple de dos máquinas
(a) sin compensación (b) con un compensador en el punto medio

2.3 FACTS: Amortiguamiento de oscilaciones de potencia

- Una perturbación puede causar que el ángulo de las máquinas oscilen a la(s) frecuencia(s) natural(es) del sistema electromecánico total.
- → Oscilación de potencia alrededor del valor de estado estable.
- El FACTS varía compensación (→ voltaje) para contraponerse a aceleraciones y desaceleraciones de la máquina (si la máquina acelera su potencia mecánica, es necesario aumentar la potencia transmitida en la línea y viceversa)



Tomado de Hingorani. Understanding FACTS.

Oscilación del ángulo del generador sin amortiguar y amortiguada gracias a la acción del FACTS

Oscilación de la potencia sin amortiguar y amortiguada gracias a la acción del FACTS

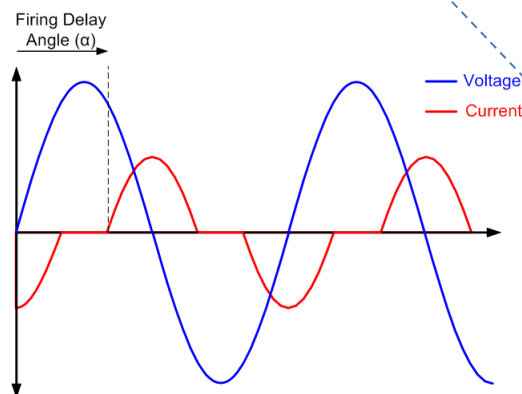
Potencia reactiva inyectada por el compensador

Inyección dinámica de potencia reactiva reduce riesgo de inestabilidad

3. Static Var Compensator (SVC) Compensador Estático de VAr (CEV)

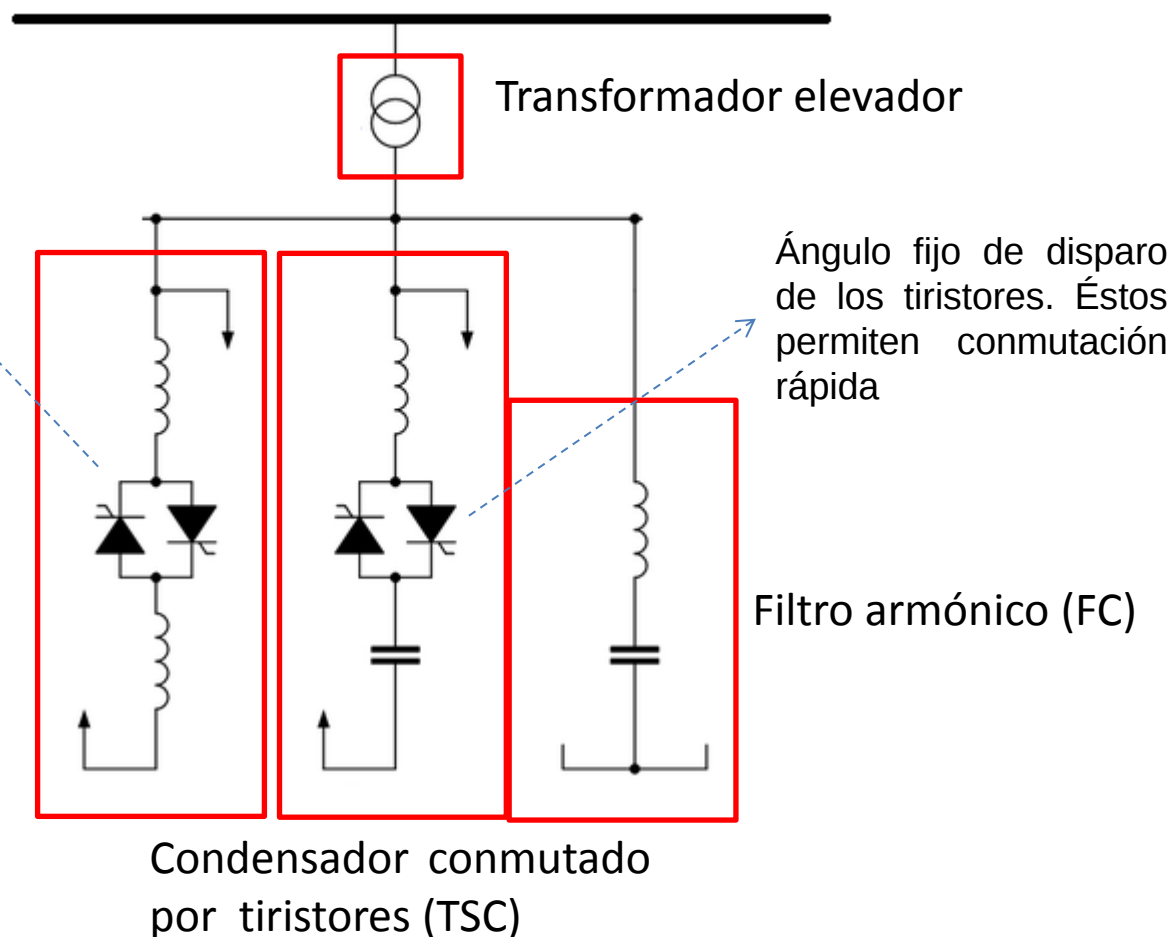
Ángulo de disparo de los tiristores variable, determina la corriente inductiva pasante →

L_{variable}



Tomado de en.wikipedia.org

Reactor controlado por tiristores (TCR)



4. SVC de Tunal: Antecedentes



Estudios de expansión presentados CAPT/UPME y análisis UPME/XM/EEB en 2012, se identificó necesidad de equipos de compensación reactiva dinámica en el Área Oriental para garantizar abastecimiento de la demanda.



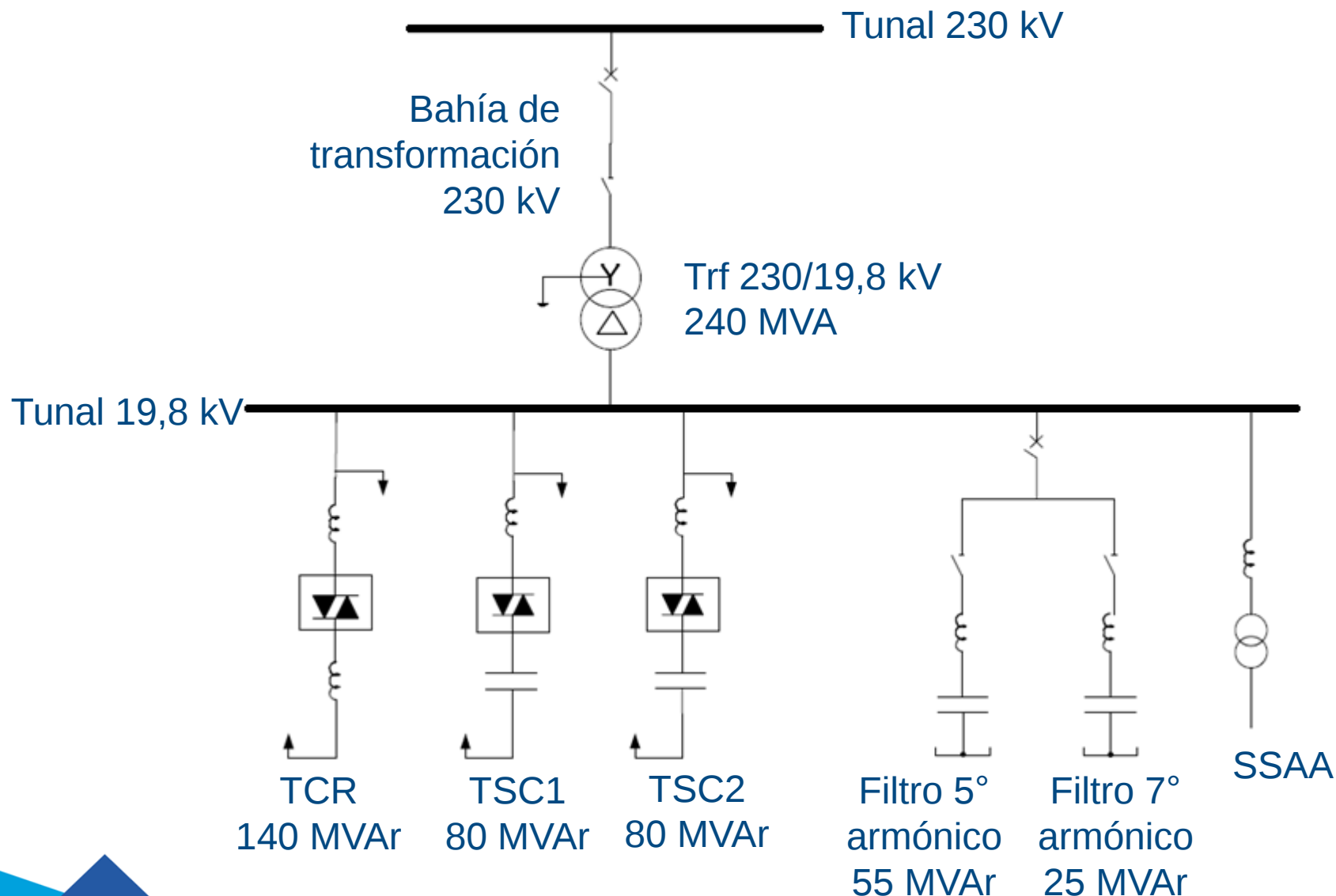
Posible retraso N. Esperanza en 2014, la operación del Área ante las contingencias más severas exigía requerimiento de inyección de potencia reactiva entre 400 a 600 MVar, necesarios para garantizar confiabilidad y seguridad del área en los próximos años.



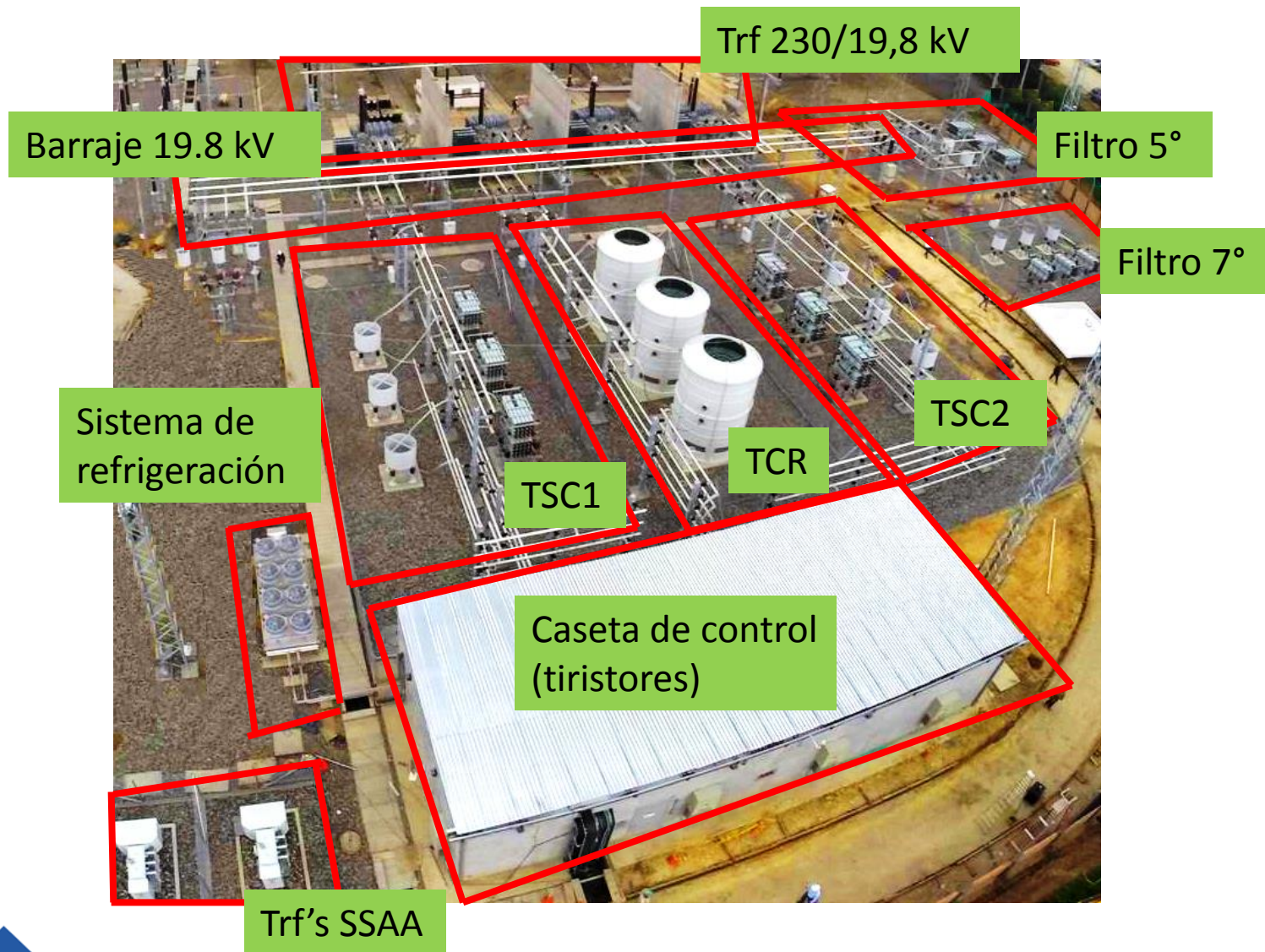
Se decidió la instalación de un SVC en Tunal 230 kV y un STATCOM en Bacatá 500 kV.

Área Oriental. Tomado de Plan Expansión UPME 2013-2027

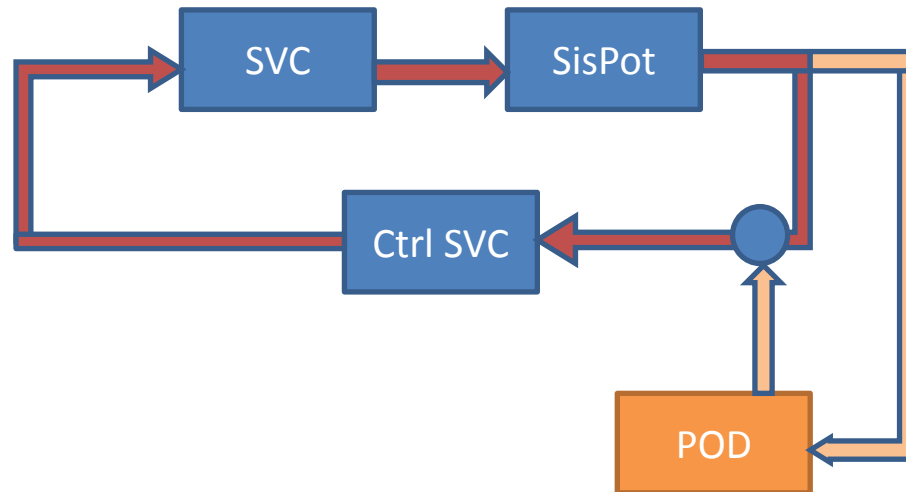
4. SVC de Tunal: Diagrama unifilar



4. SVC de Tunal: disposición física



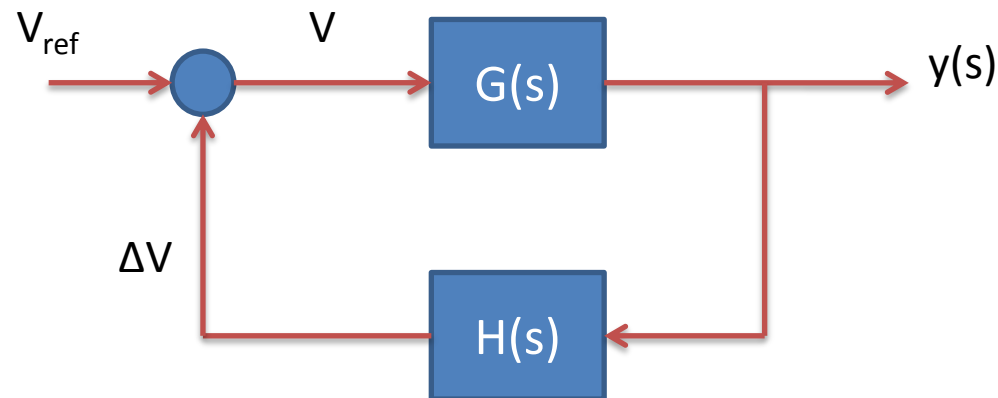
4.1 SVC: Amortiguador de oscilaciones de potencia (POD)



- Aumentar el amortiguamiento de oscilaciones, lo cual implica el aumento de estabilidad del sistema, lo que está directamente relacionado con el aumento de los márgenes de seguridad del STN.
- Reducir las probabilidades de eventos catastróficos, como apagones causados por pérdida de estabilidad angular o de tensión.

4.1 SVC: Amortiguador de oscilaciones de potencia (POD)

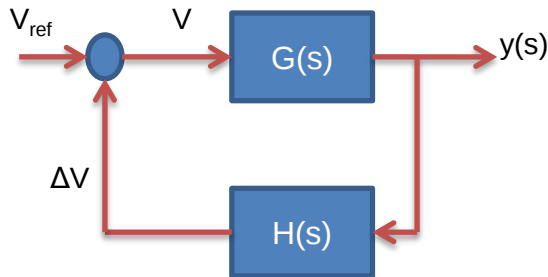
- El control del POD está compuesto primordialmente por tres bloques: *washout*, ganancia de estabilización, bloque de adelanto/atraso y opcionalmente un filtro.
- El número de bloques (estados) asociados a cada etapa depende del sistema dinámico a controlar.



$$H(s) = K * \frac{1}{1 + sT_m} * \frac{sT_\omega}{1 + sT_\omega} * \left[\frac{1 + sT_{lead}}{1 + sT_{lag}} \right]^{m_c} * \frac{1}{as^2 + bs + c} = KH_1(s)$$

Tomado de [1][2][4][7][8]

4.2 Modificación de modos de oscilación gracias al POD

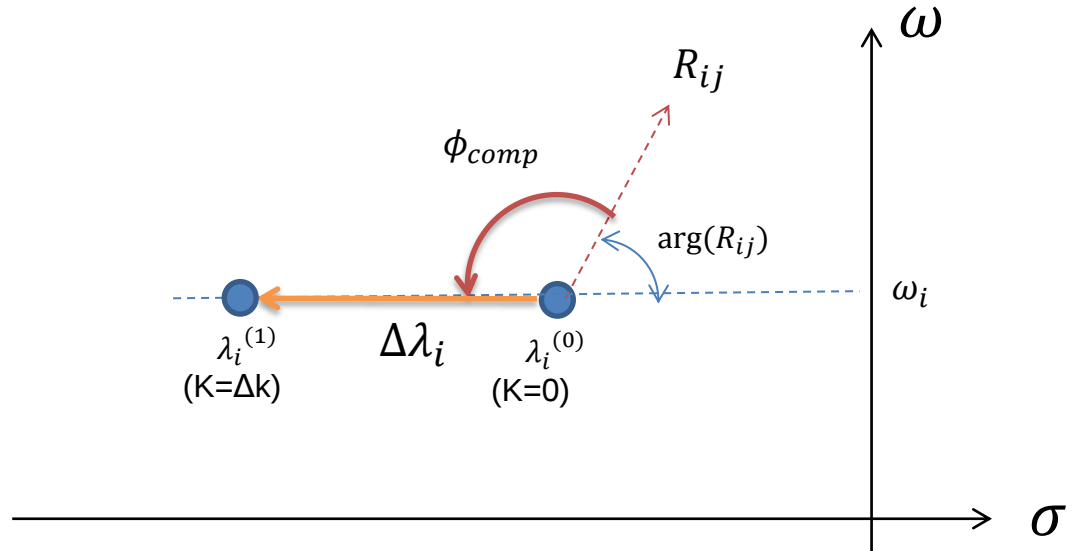


$$H(s) = KH_1(s)$$

$$G_j(s) = \frac{y_j}{u_j} = \sum_{i=1}^n \frac{R_{ij}}{s - \lambda_i}$$

Los R_{ij} son los residuos asociados con el modo i -ésimo para cierta entrada y salida (j) del sistema (por ejemplo, entrada Voltaje del SVC, salida, corriente en una línea)

El POD lleva el modo a una región más estable:



4.3 SVC de Tunal durante un evento real

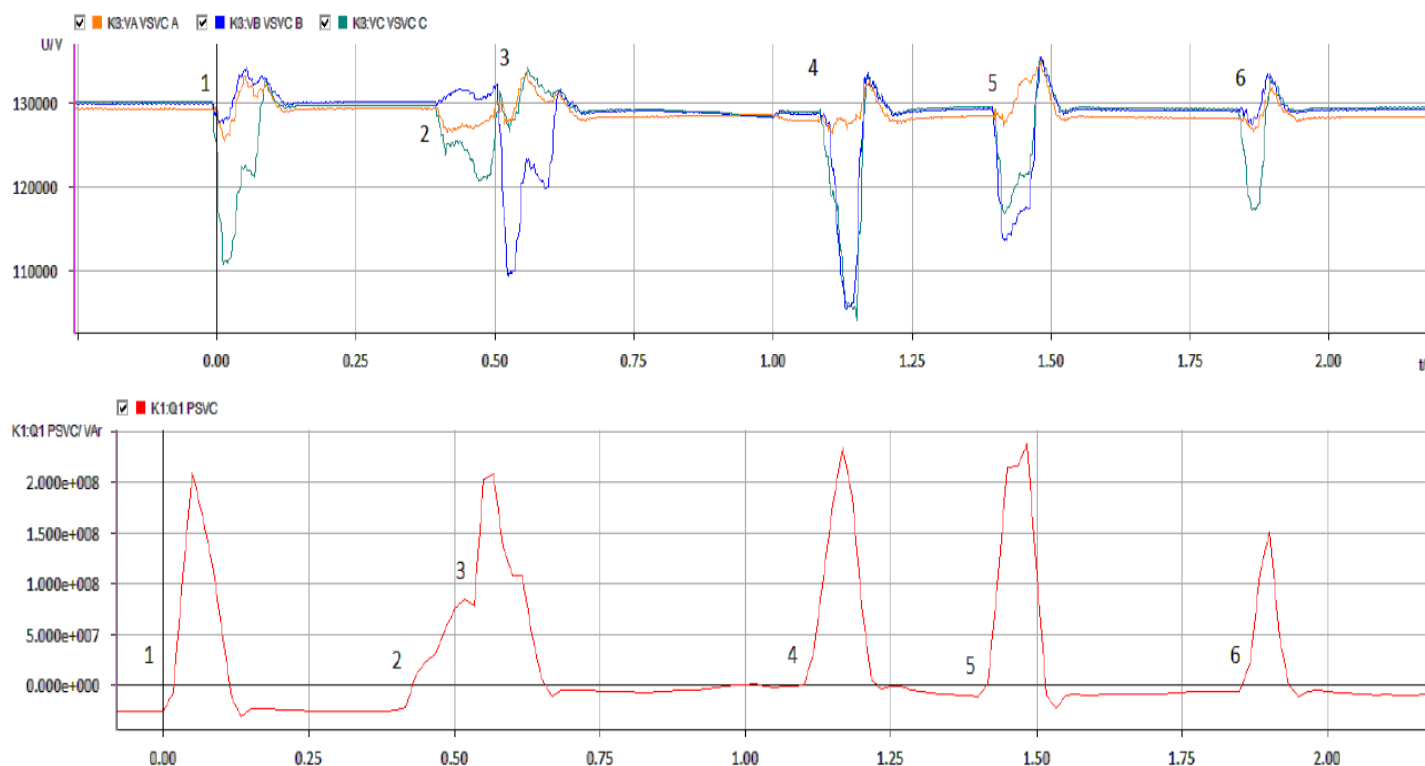
- El 12 de Junio de 2015, a las 4:41:44 se produjo falla permanente de las líneas Tunal – Guavio 230 kV y La Reforma – Guavio 230 kV, localizada a 14 km desde la subestación Guavio, causada por AMI (Acto Mal Intencionado).

#	Tiempo (ms)	Secuencia
1	0	Falla fase C LT Tunal – Guavio 230 kV
	35	Disparo fase C BL Guavio - Tunal 230 kV
	77	Disparo fase C BL Tunal – Guavio 230 kV
2	401	Falla fase C LT Guavio - La Reforma 230 kV
	458	Disparo fase C BL Guavio – La Reforma 230 kV
	500	Disparo fase C BL La Reforma – Guavio 230 kV y corte central
3	510	Falla fase B LT Tunal – Guavio 230 kV (falla evolutiva)
	546	Disparo trifásico BL Guavio - Tunal 230 kV
	580	Disparo trifásico BL La Reforma – Guavio 230 kV
	604	Disparo trifásico BL Tunal – Guavio 230 kV
	Aprox. 766	Falla alta impedancia fase B LT Guavio - La Reforma 230 kV (evolutiva)
	1007	Disparo trifásico BL Guavio – La Reforma 230 kV
	1087	Recierre trifásico en falla BL La Reforma – Guavio 230 kV
4	1100	Recierre trifásico en falla BL Guavio - Tunal 230 kV
	1149	Disparo trifásico definitivo BL Guavio - Tunal 230 kV
	1161	Disparo trifásico definitivo BL La Reforma – Guavio 230 kV
5	1400	Recierre trifásico en falla BL Tunal – Guavio 230 kV
	1470	Disparo trifásico definitivo BL Tunal – Guavio 230 kV
6	1842	Recierre trifásico en falla BL Guavio – La Reforma 230 kV
	1884	Disparo trifásico definitivo BL Guavio – La Reforma 230 kV

En **rojo**: momentos de importante inyección del SVC de TUNAL

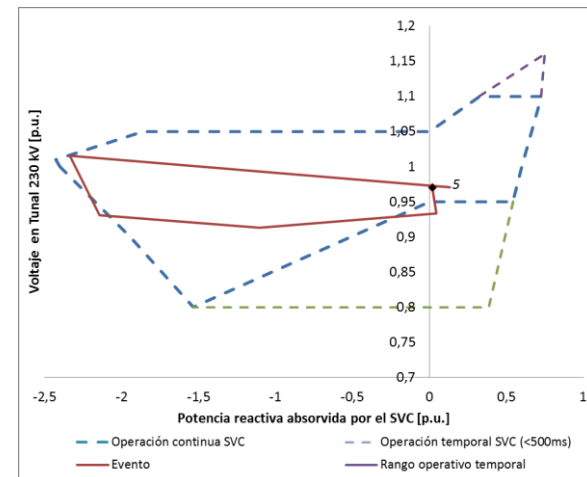
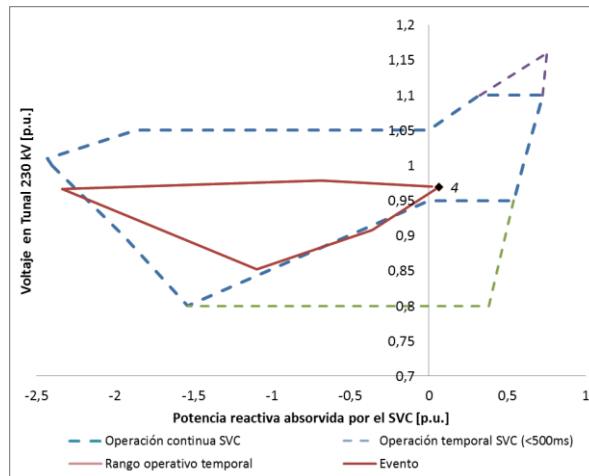
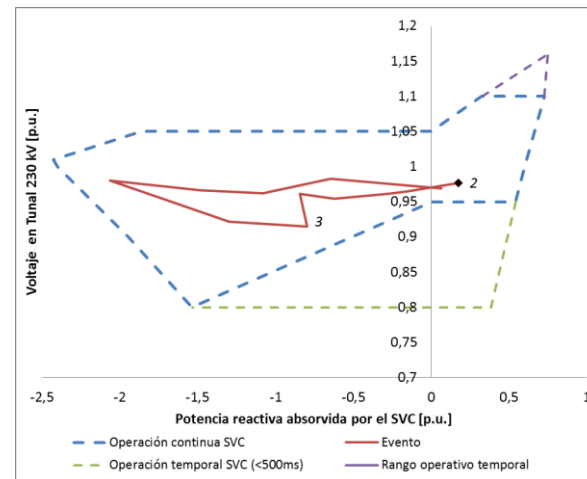
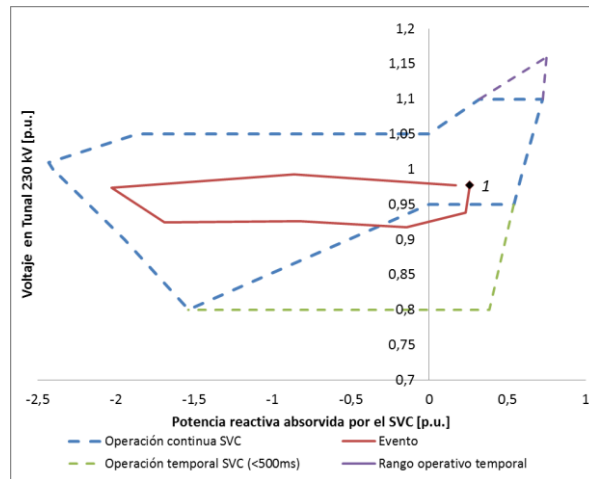
4.3 SVC de Tunal durante un evento real

- Arriba: Voltajes de las fases en Tunal 230 kV [V]
- Abajo: Potencia reactiva [VAR] inyectada por el SVC de Tunal durante el evento.



4.3 SVC de Tunal durante un evento real

- Evolución de la característica V-Q durante distintos momentos del evento



4.3 SVC de Tunal durante un evento real

- Análisis de la respuesta en distintos momentos del evento

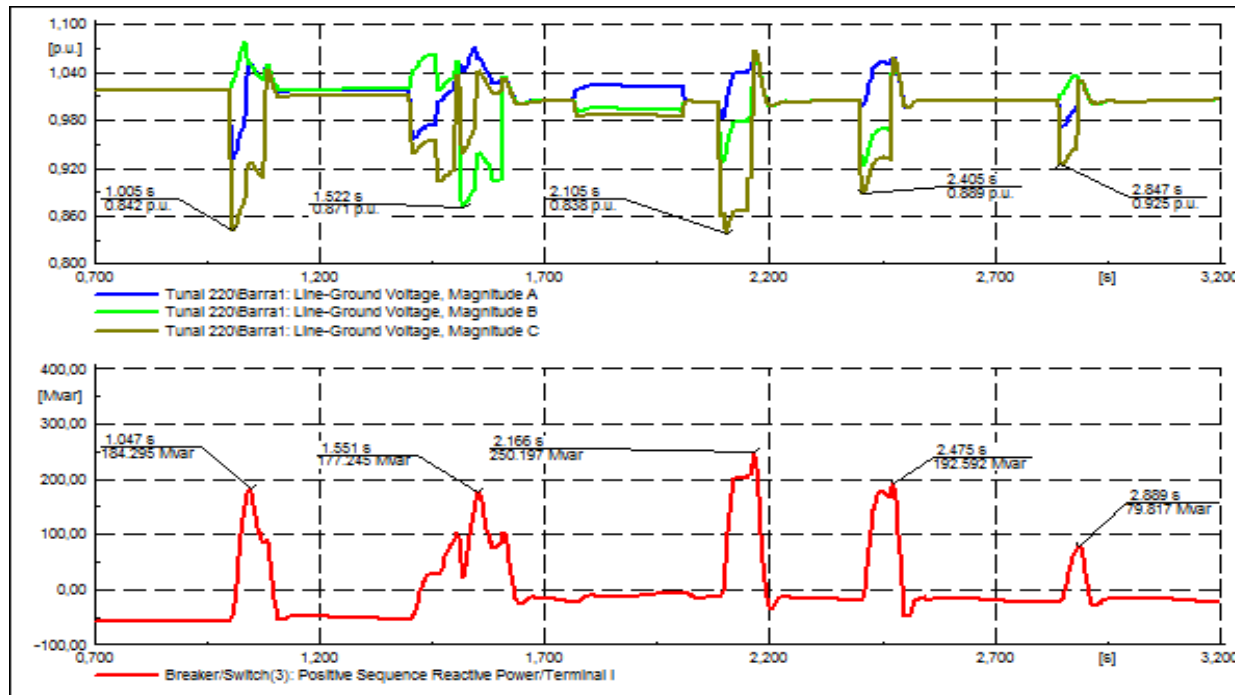
t(ms)	Fase	Valor máximo tensión [kV]	Valor estable tensión [kV]	Sobrepico [%]	Tiempo de establecimiento (ms)
54	B	134.04	130.18	2.965%	79
558	C	134.12	129.24	3.775%	99
1170	C	133.46	129.59	2.986%	103
1483	C	135.46	129.39	4.694%	95
1895	B	133.54	129.07	3.463%	99

- Valores máximos de potencia reactiva inyectada por el SVC

t(ms)	Evento asociado	Potencia reactiva inyectada por el SVC [MVar]
50	Falla fase C LT Tunal – Guavio 230 kV	207.9
565	Falla fase B LT Tunal – Guavio 230 kV	207.8
1167	Recierre trifásico en falla BL Guavio - Tunal 230 kV	233.8
1483	Recierre trifásico en falla BL Tunal – Guavio 230 kV	236.6
1900	Recierre trifásico en falla BL Guavio – La Reforma 230 kV	150.7

4.3 SVC de Tunal durante un evento real

- Arriba: Voltajes de las fases en Tunal 230 kV [V]
- Abajo: Potencia reactiva [Var] inyectada por el SVC de Tunal durante el evento.



Se realizó simulación con POD (ajustes propuestos por el fabricante) y se obtiene respuesta bastante similar, comprobando que no se tienen efectos indeseados bajo este tipo de eventos.



ENERGIA
de Bogotá

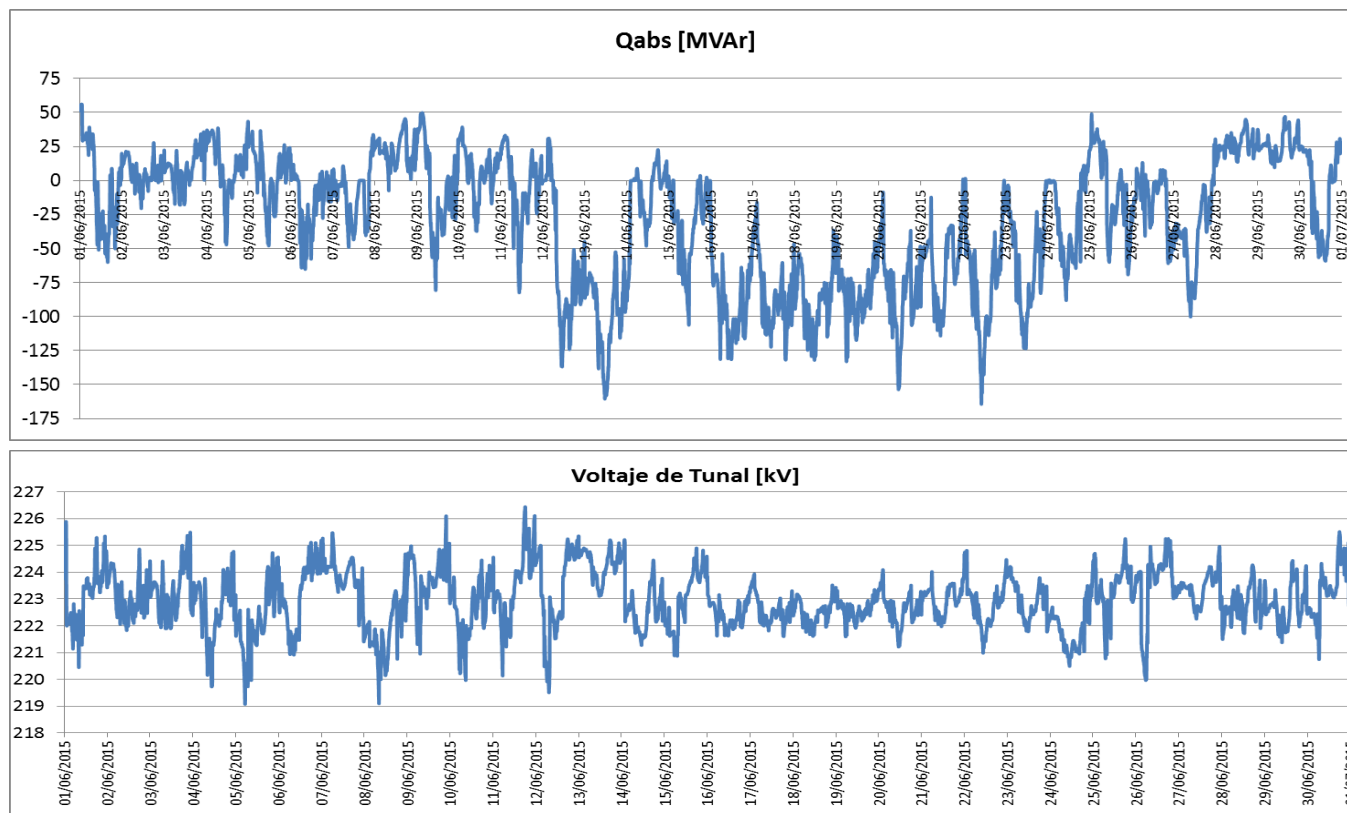
CASA MATRIZ DEL:



GRUPO ENERGÍA
DE BOGOTÁ

4.4 Comportamiento SVC durante Junio 2015

- Voltaje de Tunal 230 kV y potencia reactiva absorbida por el SVC.



Antes de contingencia N-2

Contingencia N-2

Contingencia N-1 (Mtto)

4.4 Comportamiento SVC durante Junio 2015

- Resumen de estadísticas de inyección (valores negativos corresponden a puntos capacitivos)

Estadística	Periodo 1 (01/06 – 12/06)	Periodo 2 (12/06 – 24/06)	Periodo 3 (24/06 – 30/06)
Media aritmética (MVar)	1.90	-67.70	-2.17
Desviación estándar (MVar)	23.54	37.68	32.09
Mínimo (MVar)	-82.60	-164.24	-100.17
Máximo (MVar)	55.95	22.56	48.68
Porcentaje de tiempo entre -40 y 30 MVar	83.6%	23.4%	73.0%
Porcentaje de tiempo por encima de 30 MVar	10.3%	0%	11.2%
Porcentaje de tiempo por debajo de -40 MVar	6.1%	76.6%	15.8%
Tiempo por fuera del rango de flotación (horas)	44	232	34

El SVC debe ser operado en flotación [-40, 30 MVAR]

5. Conclusiones

- Los FACTS son dispositivos muy importantes para la operación del sistema de transmisión y contribuyen directamente a la mejora de la estabilidad del sistema, tanto de voltaje como transitoria, lo cual conlleva a la disminución de riesgos de apagones, gracias a que se aumentan los márgenes de estabilidad.
- Los FACTS pueden incluir la función de amortiguamiento de oscilaciones de potencia, POD, enfocada en mejorar el amortiguamiento de los modos de oscilación electromecánica producido por los generadores ante perturbaciones de la red. Lo anterior disminuye el riesgo de colapso por inestabilidad dinámica.
- El SVC no debería ser utilizado en primera medida para el control de tensión en estado estable del STN. Ante contingencias permanentes, se deben utilizar los recursos disponibles para mantener en el rango de flotación el FACTS, por supuesto sin sacrificar la seguridad del STN.
- El SVC mostró un gran aporte al sostenimiento de la tensión durante la condición N-2 en la que se encontró el área Oriental en Junio de 2015.
- Se resalta la necesidad de establecer responsabilidades por los ajustes del POD, para lo cual se propuso recientemente elaborar acuerdo CNO relacionado con FACTS.

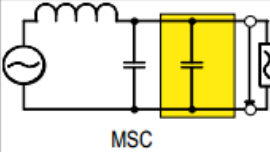
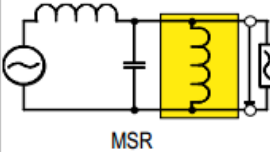
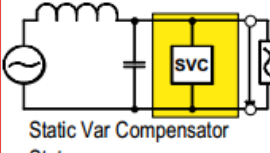
6. Referencias

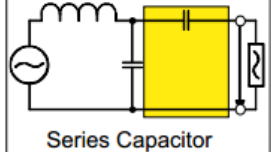
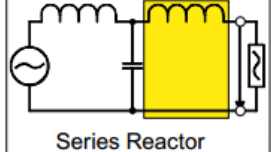
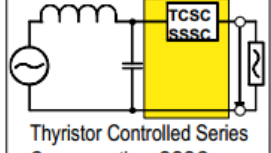
1. Hingorani, N, Gyugyi, L. *"Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems"*. IEEE Power Engineering Society. ISBN 0-7803-3455-8, 1999
2. Tyll, H.K., "FACTS technology for reactive power compensation and system control" Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES
3. Ostojic, D.R. *"Stabilization of Multimodal electromechanical oscillations by coordinated application of power system stabilizers"*. Transactions on Power Systems. 1991
4. ABB. Wenkan Huang. *POD functional test in customer grid for Tunal SVC*.
5. Kundur, P.; Klein, M.; Rogers, G.J.; Zywno, M.S., "Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability", Power Engineering Review, IEEE, 1989
6. Magdy E. Aboul-Ela, A.A. Sallam, et al, *"Damping Controller design for power system oscillations using global signals"*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, May 1996.
7. Manuel Sosa González. *"Sintonización de estabilizadores de sistemas de potencia en sistemas eléctricos"*. Universidad Carlos III De Madrid. 2010
8. D. Cerón, M. A. Rios. *"Decentralized Control for FACTS using POD"*. ANDESCON, 2010 IEEE.
9. Jalilvand, A.; Keshavarzi, M.D., *"Adaptive SVC damping controller design, using residue method in a multi-machine system"* Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2009.
10. Chandrakar, V.K, et al., *"Performance Comparison of SVC with POD and PSS for Damping of Power System Oscillations"*, 3rd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET), 2010

ANEXOS

Tipos de FACTS

- Compensaciones serie y paralela:** Aplicación, consecuencia en el nivel de cortocircuito y sobre el ángulo de fase de transmisión:

Shunt compensation	Application	Short -circuit level	Transmission phase angle
 MSC	voltage stabilisation at heavy load	nearly unchanged	slightly increased
 MSR	voltage stabilisation at light load	nearly unchanged	slightly decreased
 Static Var Compensator Statcom	fast voltage control reactive power control damping of power swings	nearly unchanged	controlled

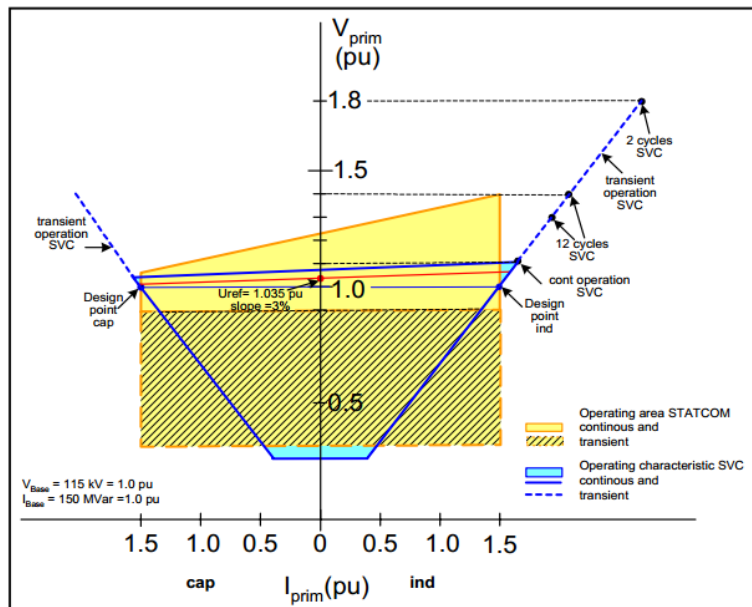
Series compensation	Application	Short-circuit level	Transmission phase angle
 Series Capacitor	long transmission lines bulk power transmission	increased	much smaller
 Series Reactor	short transmission lines, limitation of short-circuit currents	decreased	much larger
 Thyristor Controlled Series Compensation, SSC	PFC POD SSR mitigation FCL	controlled	controlled

- Control de tensión
- Control de potencia reactiva
- Amortiguamiento de oscilaciones
- Estabilidad

- Reduce caídas de voltaje
- Reduce impedancia de transferencia (ángulo)
- Estabilidad
- Control de flujo de potencia
- Amortiguamiento

FACTS tipo shunt o paralelo

Utilizados para controlar la tensión de una barra, y con esto mejorar la capacidad de transporte de las líneas, prevenir inestabilidad de voltaje y mejorar la estabilidad transitoria

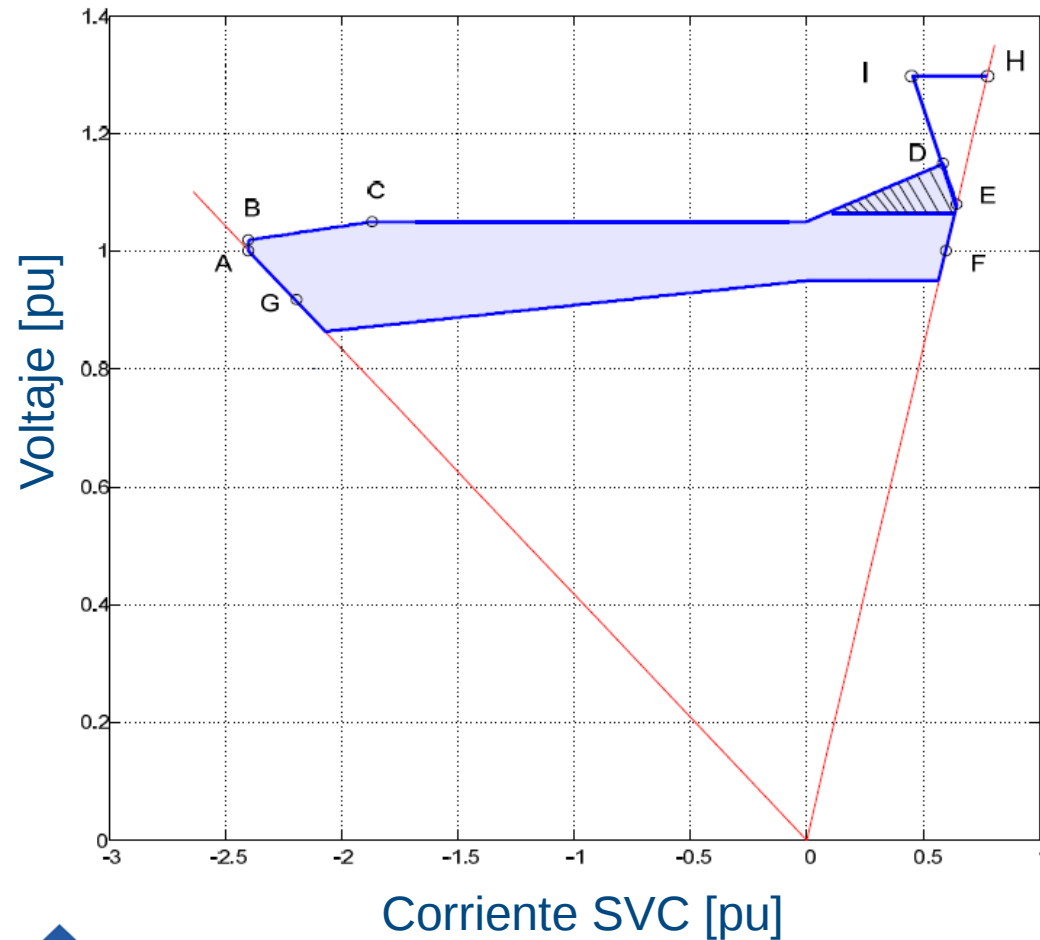


Tomado de H. K. Tyll, SM IEEE. FACTS Technology for Reactive Power Compensation and System Control

Issue	Statcom	SVC
V/I characteristic	good undervoltage performance Current source	good overvoltage performance Impedance
Control range	Symmetrical otherwise Hybrid solutions	freely adjustable to any range by TCR/TSR/TSC branches
Modularity	Same converter usable for various applications (STATCOM, UPFC, CSC, B2B etc) Redundancy no degraded mode	TCR/TSR/TSC branches used in SVC and TCSC/TPSC Redundancy Degraded mode operation
Response time	1 to 2 cycle	2 to 3 cycle
Transient behaviour	Self protecting at critical system faults	Available before, during and after critical system conditions
Space requirements	40 to 50 %	100 %
Availabilty	96 to 98 %	> 99 %
Investment costs	120 to 150 %	100 %

SVC de Tunal: característica V - I

Vista desde el lado primario



- Regulación de tensión
- Sobretensión temporal
- Subtensión temporal

 Operación continua

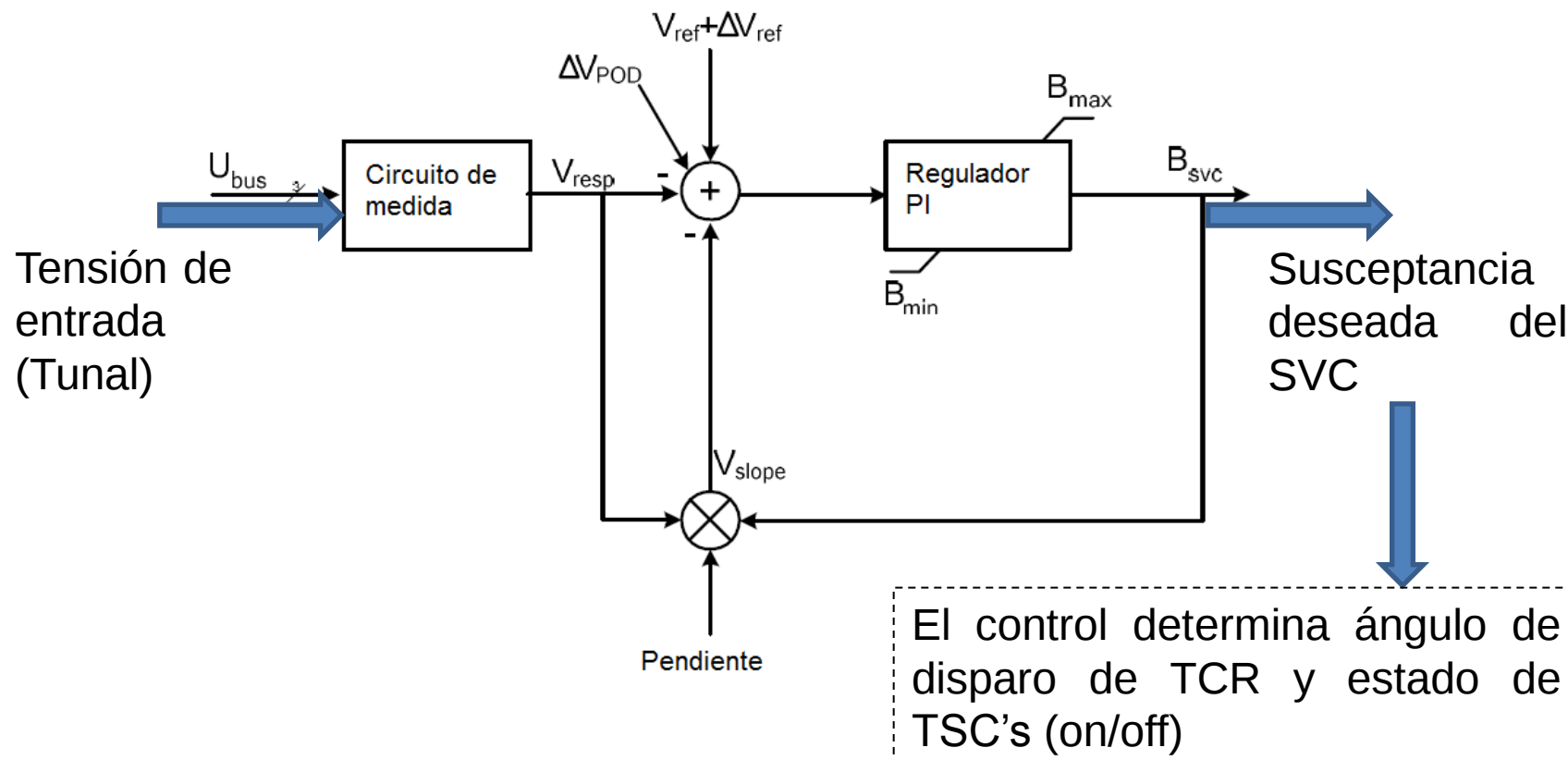
 Operación temporal

SVC de Tunal: Sistema de Control (SdC)

- ✓ El SVC es controlado por un sistema de control basado en microprocesadores.
- ✓ Los PT y CT dedicados proporcionan al sistema de control las variables de la red que se emplean en el control.
- ✓ El SdC proporciona medios para el control del SVC, ya sea desde un Estación de Trabajo de Operador (OWS) en la sala de control del SVC o remotamente vía una interfaz GWS (GateWay Station) conectada al sistema RTU/SCADA convencional.
- ✓ El SdC del SVC está estructurado en los siguientes modos:
 1. Control de Tensión Automático
 2. Control Manual

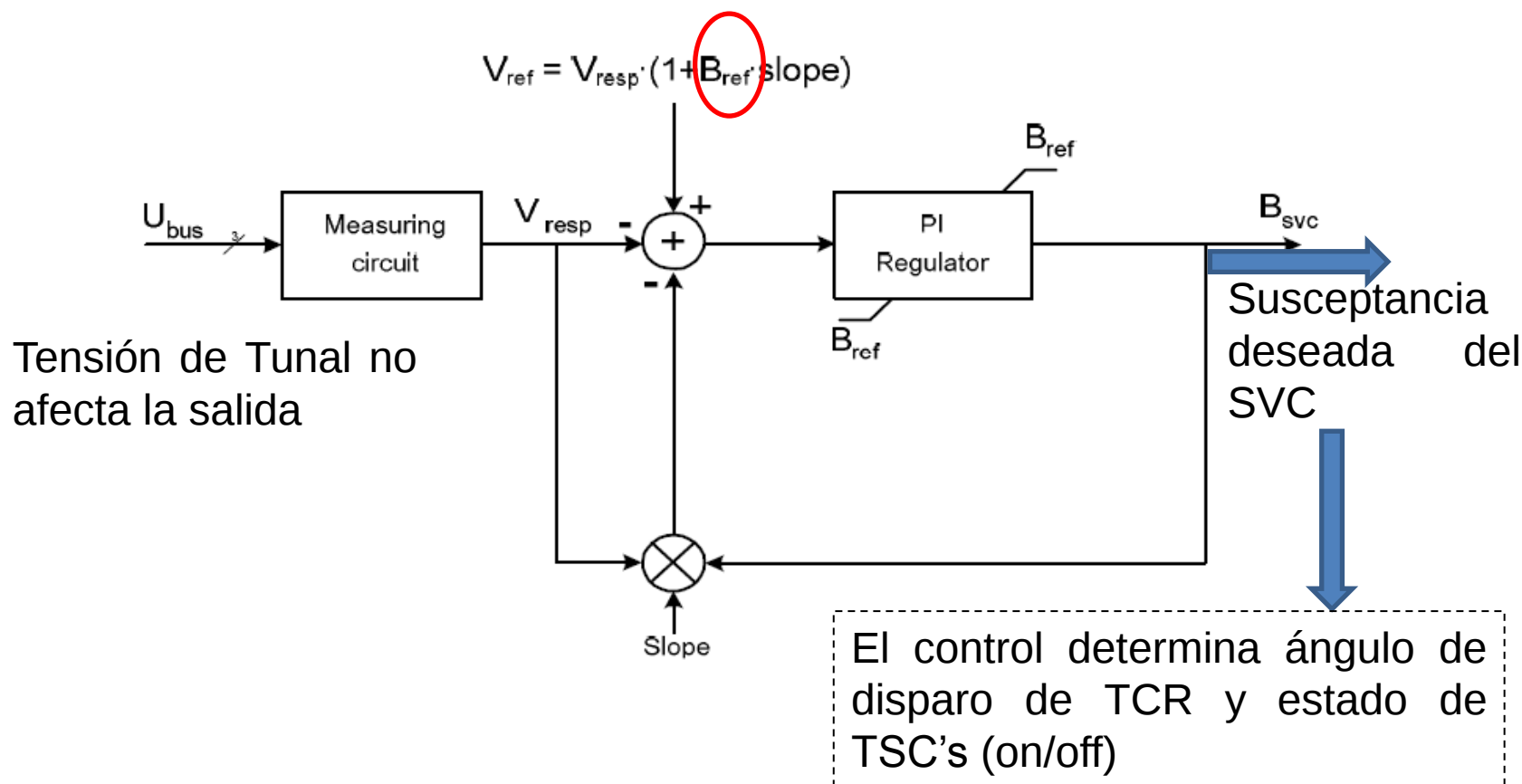
SVC de Tunal: Sistema de Control

- Diagrama de bloques simplificado del regulador de tensión, en el **modo de control de tensión automático**



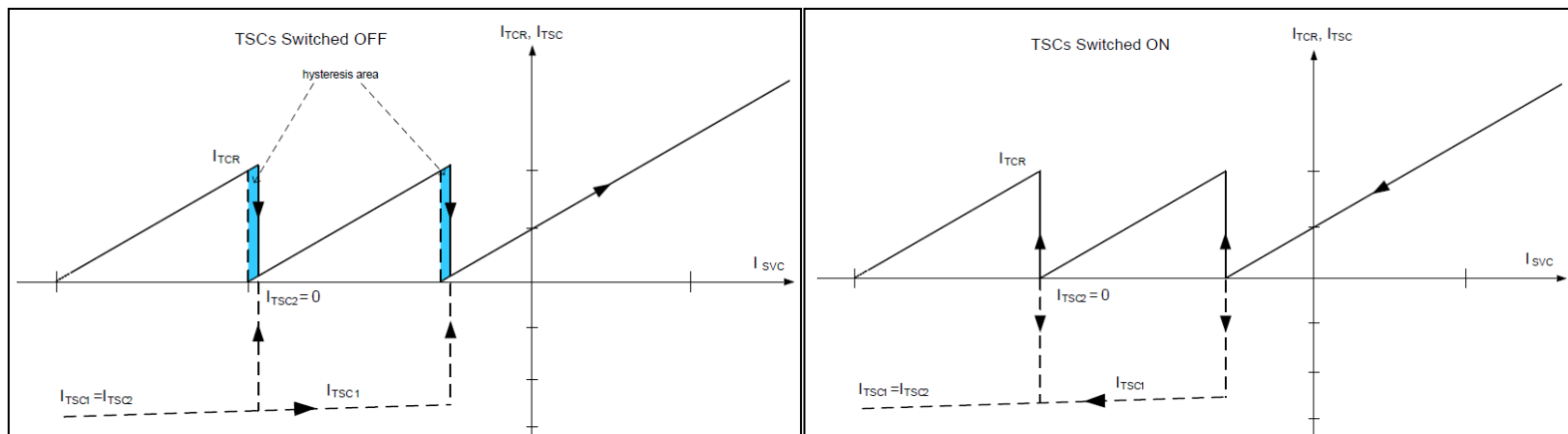
SVC de Tunal: Sistema de Control

- Diagrama de bloques simplificado del regulador de tensión, en el **modo de control manual**



SVC de Tunal: Sistema de Control

- Función de conmutación del TSC
 - Para evitar inestabilidad, existe histéresis entre puntos de conmutación, debido a que existen configuraciones que resultan en una misma de salida de Q.



Puntos de conmutación de los TSC

- Función de minimización de pérdidas: Impide que TCR opere fuera del área de histéresis por periodos de larga duración.
- Distribución de susceptancia del TCR: considera la polaridad y la tensión del TSC para determinar la susceptancia del TCR en la conmutación del TSC.

SVC de Tunal: Sistema de Control

- Otras funciones de control:
 - ✓ Supervisión de ganancia
 - ✓ Estrategia de subtensión
 - Subtensión severa
 - Subtensión
 - ✓ Modo reducido de operación
 - Modos degradados de operación
 - Secuencias de autorrecierre
 - Secuencia de operación ante falla en un TSC
 - Secuencia de operación ante falla en SSAA
 - Secuencia de operación ante falla en TCR
 - Secuencia de operación ante falla en filtros
 - ✓ Localizador de Fallas a Tierra (desbalance de tensión)
- Algunas funciones de protección: limitación de corriente primaria, limitación de tensión secundaria, limitación de corriente del TCR, control de corriente continua del TCR, sobrecorriente de válvula del TSC, sobretensión del capacitor de un TSC, sobretensión válvula TSC