

ANALISIS ECONOMICO Y FINANCIERO PARA EL MONTAJE
ELECTROMECAÁNICO Y PUESTA EN SERVICIO DE UN COMPENSADOR
ESTATICO DE REACTIVOS SVC EN LA PLANTA DE ACERO DIACO

SARA JULIANA ACEVEDO RODRÍGUEZ
EDGAR LEONARDO GOMEZ VASQUEZ



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE RECURSOS ENERGÉTICOS
PROMOCIÓN XVI
BUCARAMANGA
2013

ANALISIS ECONOMICO Y FINANCIERO PARA EL MONTAJE
ELECTROMECAÁNICO Y PUESTA EN SERVICIO DE UN COMPENSADOR
ESTATICO DE REACTIVOS SVC EN LA PLANTA DE ACERO DIACO

SARA JULIANA ACEVEDO RODRÍGUEZ
EDGAR LEONARDO GOMEZ VASQUEZ

Monografía de grado para optar al título de
Gerente de Recursos Energéticos

Director
Ingeniero CESAR GIOVANNI ACEVEDO ARENAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE RECURSOS ENERGÉTICOS
PROMOCIÓN XVI
BUCARAMANGA
2013

Nota de aceptación:

Presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Octubre de 2013

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	8
1. MARCO TEÓRICO	9
1.1. DEFINICIÓN COMPENSACION DEL FACTOR DE POTENCIA.....	9
1.2. ELEMENTOS Y PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO SVC.....	10
1.2.1. CONDENSADOR CONMUTADO POR TIRISTORES (TSC).....	10
1.2.2. BOBINA CONTROLADA POR TIRISTORES (TCR).....	13
1.2.2.1. Configuración Trifásica del TCR	15
1.3. APLICACIONES DEL SVC.....	17
1.3.1. CONFIGURACION DEL SVC.....	18
1.3.2. CONTROL DE TENSION Y CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA 19	
1.3.3. CONTROL DE TENSION MEDIANTE SVC	20
1.3.4. CORRECCION DE FACTOR DE POTENCIA MEDIANTE SVC	23
2. MARCO REGULATORIO	24
2.1. REGULACION VOLTAJE.....	25
2.2. FACTOR DE POTENCIA.....	26
2.3. ARMONICOS EN LA RED.....	26
2.4. PENALIZACIONES	27
2.5. REMUNERACIÓN POR ACTIVOS – CREG	27
3. PLANTA DIACO DE ACEROS	28
3.1. CARACTERISTICAS DEL SISTEMA ELÉCTRICO ACTUAL.....	29
3.2. PROBLEMÁTICA Y METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA COMPENSACIÓN DE REACTIVOS	30
3.2.1. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA COMPENSACIÓN DE REACTIVOS.....	31
4. PARAMETROS ECONOMICOS DEL PROYECTO.....	33
4.1. ESTIMACION DE INVERSIONES DE LOS EQUIPOS.....	33
4.2. COSTOS DE OPERACIÓN	33
4.3. PAUTAS DEL PROYECTO	34
5. EVALUACION ECONOMICA DEL PROYECTO.....	35
5.1. VALOR PRESENTE NETO (VPN)	35
5.2. TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)	35
5.3. RECUPERACION DE LA INVERSION.....	36
5.4. RENDIMIENTO POR UNIDAD DE INVERSION (IVAN).....	36

6.	DESARROLLO DE LA EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO	37
6.1.	ESCENARIO A. FLUJO DE CAJA PROYECTO CON RECURSOS PROPIOS	37
6.2.	ESCENARIO B. FLUJO DE CAJA PROYECTO CON FINANCIACIÓN	38
7.	ANALISIS DE SENSIBILIDAD	39
7.1.	ESCENARIO A. PROYECTO CON RECURSOS PROPIOS.....	39
7.1.1.	SENSIBILIDAD EN LA INVERSION.....	39
7.1.2.	SENSIBILIDAD DE LOS INGRESOS.....	40
	CONCLUSIONES.....	41
	BIBLIOGRAFIA	42

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema simplificado para un SVC.....	10
Ilustración 2. Configuración de un TSC.....	10
Ilustración 3. Esquema equivalente de un TSC.....	11
Ilustración 4. Evolución del valor de pico de la corriente de conexión ($I_p/\sqrt{2}I$) en función de la tensión en el instante de conexión ($e(t')/\sqrt{2}E$) para distintos valores de la tensión residual U_0	12
Ilustración 5. Intensidad en de conexión en un TSC cuando $e(t') = U_0 = 0$	13
Ilustración 6. Compensación de reactiva mediante una batería automática de condensadores.....	13
Ilustración 7. Configuración de un TCR.....	14
Ilustración 8. Formas de onda de intensidad en un TCR.....	14
Ilustración 9. Forma de onda y espectro armónico para un TCR con un ángulo de disparo de 150° y con un 5% de diferencia entre el ángulo de disparo de TR1 y el de TR2.....	15
Ilustración 10. Configuraciones trifásicas del TCR.	15
Ilustración 11. Evolución de la componente fundamental de la intensidad de línea y de su THD en función del ángulo de disparo para un TCR en estrella con neutro (YN), en estrella con neutro aislado (Y) y en triángulo (D).....	16
Ilustración 12. Intensidades de línea en un TCR trifásico para un ángulo de disparo $\alpha = 160^\circ$	17
Ilustración 13. SVC fabricado por Alstom de +30/-25MVar en 66kV.....	18
Ilustración 14. Composición por fase de un SVC.	18
Ilustración 15. Evolución de la reactiva generada por un SVC formado por TSC+TCR.....	19
Ilustración 16. Circuito Equivalente.	19
Ilustración 17. Configuración para el control de la tensión mediante un SVC.	21
Ilustración 18. Circuito ejemplo de control de tensión con un SVC.	21
Ilustración 19. Tensión en las cargas y susceptancia del SVC.	22
Ilustración 20. Aplicación del SVC en líneas de transporte.	23
Ilustración 21. Evolución de la potencia en una línea de transporte en función del desfase δ entre las fuentes de tensión conectadas a sus extremos	23
Ilustración 22. Evolución de la intensidad eficaz consumida por el conjunto del compensador más la carga en función del ángulo de disparo.....	24
Ilustración 23. Ubicación geográfica de Tocancipá.	29
Ilustración 24. Diseño final	32
Ilustración 25. Planos diseño final	32
Ilustración 26. Gráfica de sensibilidad de la inversión.....	39
Ilustración 27. Gráfica sensibilidad de los ingresos.....	40

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características eléctricas del sistema y del sitio del proyecto.	29
Tabla 2. Reporte subestaciones factor de potencia inferior a 0,9.....	30
Tabla 3. Tarifas de CODENSA sector no residencial	31
Tabla 4. Presupuesto proyecto DIACO.	33
Tabla 5. Costos totales proyecto DIACO SVC.	34
Tabla 6. Pautas del proyecto de Compensación SVC.....	35
Tabla 7. Flujo de caja proyecto con recursos propios.	37
Tabla 8. Flujo de caja proyecto con financiación.....	38
Tabla 9. Sensibilidad de la inversión.	39
Tabla 10. Sensibilidad de los ingresos.	40

INTRODUCCION

Uno de los principales problemas inherentes a las redes de transporte de energía eléctrica a lo largo del tiempo ha sido, encontrar un mecanismo totalmente eficiente para la compensación de reactivos en dichos sistemas. Normalmente, las soluciones obtenidas han sido básicamente la conexión en paralelo de bancos de condensadores con la carga, de esta forma, el factor de potencia del conjunto formado por la carga más el elemento de compensación será mayor que el de únicamente la carga. Sin embargo éste método presenta múltiples desventajas como lo son: sensibilidad a los armónicos, dependencia con la tensión, resonancia con los elementos inductivos, afectación de la estabilidad de las máquinas presentes en la misma red, entre otros.

Po lo anterior y a raíz de la importancia tanto a nivel empresarial como domestica de tener calidad y confiabilidad en el servicio de la energía eléctrica, aunado a la exigente reglamentación instituida en los diferentes países, la industria de la electricidad se ha visto en la obligación de encontrar nuevos elementos en pro de alcanzar los más altos estándares de calidad; buscando disminución en costos, incremento de la productividad y seguridad en sus conexiones en cualquier punto de la red.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente y a partir de un análisis del escenario eléctrico de la Planta de aceros de DIACO, se evidenció la generación de problemas de caídas de tensión; originando salidas de circuitos pertenecientes a plantas aledañas a la zona lo que conllevaba la suspensión del servicio por varios minutos en el sector. A raíz de lo cual, DIACO planteó la necesidad de financiar un sistema de compensación estático de reactivos (SVC), con el fin de mejorar la calidad del flujo eléctrico en el sistema y disminuir las caídas de tensión, incrementando la confiabilidad y continuidad del servicio de la red de CODENSA.

Dado que es un sistema novedoso en el país, conllevó al interés de tomarlo como caso de análisis para la presente monografía con el objetivo principal de evaluar la viabilidad técnica y financiera de la instalación del sistema de compensación estático de potencia reactiva. El cual está basado en aplicaciones de electrónica de potencia; método que cada vez está siendo más empleado, y son, cada vez más, una alternativa para superar situaciones de control de la potencia reactiva. Aunado se estudiará la viabilidad económica y el análisis de riesgos y sensibilidades propios del proyecto, para las partes involucradas en el montaje y funcionamiento del sistema de compensación SVC en la planta de aceros DIACO.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. DEFINICIÓN COMPENSACION DEL FACTOR DE POTENCIA

El control de reactivos dentro del sistema de potencia debe suplir la demanda y soportar la tensión, tanto en operación normal como en contingencias, manteniendo la calidad en el servicio y buscando criterios de eficiencia en la operación. (1)

El primer criterio que se puede utilizar consiste en diferenciar la potencia reactiva que es demandada por los diferentes usuarios y la potencia reactiva que es requerida por el sistema para mantener las tensiones dentro de los límites establecidos, siendo posible la atención de la demanda de reactivos de una manera local mediante la instalación, por parte de los usuarios y de las empresas de distribución, de compensaciones reactivas, y el control de las tensiones a la entrada de los sistemas de distribución es realizado mediante los generadores y equipos de control y compensación en el STN. (1)

La operación del sistema, para mantener los perfiles de tensión y los límites de estabilidad, es compleja debido a la naturaleza cambiante de la carga y por ende de la demanda de reactivos, lo que origina momentos en los cuales se requiere mucha energía reactiva y otros en los cuales no. Cuando se tiene deficiencia de potencia reactiva se presentan bajas tensiones, lo cual puede producir efectos negativos en los equipos, en la estabilidad de ángulo y en las pérdidas. Si hay exceso de reactivos, se presentan altas tensiones, las cuales pueden ocasionar problemas en el aislamiento de equipos, saturación de transformadores, problemas de confiabilidad y efectos en la magnitud de la carga y en la estabilidad de los generadores.

El flujo de potencia reactiva a través de las redes tiene las siguientes desventajas:

- Disminución de capacidad de transporte de potencia activa.
- Aumento de las pérdidas en la red.
- Deterioro del perfil de tensión y por tanto de la calidad de servicio.
- Disminución del límite de seguridad para colapso de tensión.
- Sobrecostos en la operación, por des-optimización en el despacho de los recursos de generación.

Para un control efectivo, es necesario cumplir los siguientes requerimientos (1):

- Suplir la demanda de reactivos localmente.
- Los diferentes Sistemas de Distribución Local y de Transmisión Regional deben ser autosuficientes en la demanda y generación de reactivos, estableciendo obligaciones en las diferentes fronteras comerciales.
- Ejercer el soporte de tensiones y el control a sus variaciones mediante generadores y compensadores estáticos, evitando suplir las demandas de reactivos de los usuarios y de los sistemas de distribución con los generadores.

- Evitar la transmisión de potencia reactiva a través de largas distancias.
- Ubicar los equipos de control, suministro y absorción de potencia reactiva en los puntos de la red donde sean requeridos para el control de tensiones.

1.2. ELEMENTOS Y PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO SVC

Los elementos más característicos de un SVC son los condensadores conmutados por tiristores (TSC) y las bobinas conmutadas (TSR) o controladas por tiristores (TCR), ya que estos dispositivos son los que incluyen la electrónica de potencia. En la Ilustración 1. Esquema simplificado para un SVC. Ilustración 1, se muestra un esquema simplificado para un SVC donde se incluyen los elementos anteriormente mencionados. (2)

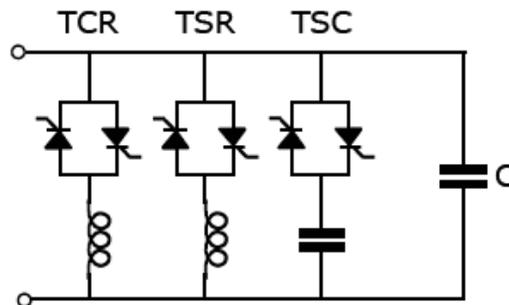


Ilustración 1. Esquema simplificado para un SVC.

1.2.1. CONDENSADOR CONMUTADO POR TIRISTORES (TSC)

El esquema del condensador conmutado por tiristor representa la configuración más sencilla de la utilización de dispositivos electrónicos de potencia en el control de reactiva. Este elemento está formado por un interruptor de estado sólido en serie con un condensador o batería de condensadores (ver Ilustración 2). (2)

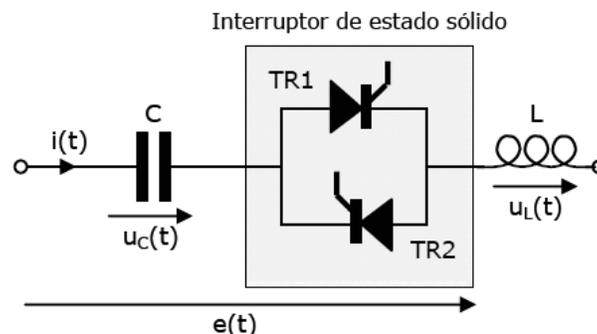


Ilustración 2. Configuración de un TSC.

En la Ilustración 2, se muestra un interruptor de estado sólido formado por dos tiristores (TR1 y TR2) en antiparalelo. De forma que, para conectar el condensador (C) se disparan los dos tiristores al mismo tiempo empezando a conducir tan pronto estén polarizados positivamente. Para la desconexión se anula la señal de disparo y los tiristores se apagarán en el instante en que la corriente que los atraviesa cruce por cero. En serie con el condensador es habitual encontrar una bobina (L en Ilustración 2), ya sea para limitar la derivada de la intensidad $di(t)/dt$ y así proteger a los tiristores, o bien, para crear un filtro sintonizado a una determinada frecuencia. (2)

La actuación del interruptor estático es prácticamente instantánea, por consiguiente, se puede elegir como instante de conexión aquel en que el valor de la tensión de alimentación provoque la menor corriente transitoria. (2)

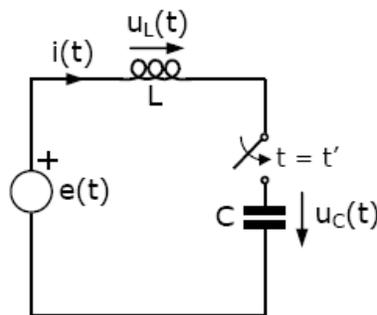


Ilustración 3. Esquema equivalente de un TSC.

Para estudiar en detalle el transitorio de conexión del condensador C cuando éste está en serie con una bobina ideal L, se emplea el circuito de la Ilustración 3, donde se considera un comportamiento ideal para el interruptor estático. (2)

La tensión de alimentación $e(t)$ se puede poner como:

$$e(t) = \sqrt{2}E \cos \omega t \quad (1)$$

Donde E es el valor eficaz de la tensión y ω su pulsación.

Por consiguiente, la expresión para la tensión del condensador $u_C(t)$ si el interruptor (ver Ilustración 3) se cierra en el instante t' es:

$$U_C(t) = U_a(t) + U_p(t) \quad (2)$$

Siendo $U_a(t)$ su componente natural y $U_p(t)$ su respuesta en régimen estacionario sinusoidal:

$$U_a(t) = K_1 \cos \omega_0(t - t') + K_2 \sin \omega_0(t - t')$$

$$U_p(t) = \sqrt{2}U_c \cos \omega t \quad (3)$$

Para la eliminación del transitorio de conexión del TSC, es necesario realizar la conexión cuando la tensión de alimentación alcance su valor de pico ($\pm\sqrt{2}E$) y mantener el condensador antes del disparo con una tensión residual determinada ($U_0 = \pm\sqrt{2}U_c$). El cumplimiento simultáneo de ambas condiciones no se puede garantizar, ya que la tensión de un condensador depende de su instante de desconexión y del tiempo que lleve desconectado. No obstante, para una tensión residual dada, se asume como aceptable que el instante más favorable para la conexión es aquel en que la tensión de alimentación es igual a la tensión residual, o lo que es lo mismo, cuando la tensión en los tiristores se anula, ya que (2):

$$K_1 = 0 \rightarrow U_0 = \sqrt{2}U_c \cos \theta \approx \sqrt{2}E \cos \theta \rightarrow e(t') \approx U_0 \quad (4)$$

Donde se tiene en cuenta que $w_0 \gg w$, y por lo tanto, $U_c \approx E$.

En la Ilustración 4 se puede ver evolución del valor de pico de la corriente de conexión I_p (relativa al valor de pico de la corriente estacionaria $\sqrt{2}I$) y en función de la tensión en el instante de conexión $e(t')$ (relativa al valor de pico de la tensión $\sqrt{2}E$) para varios valores de la tensión residual U_0 ; para un TSC alimentado a 230 V, constituido por una batería de condensadores de 2.7 kVAr y una bobina de 0.67 mH. (2)

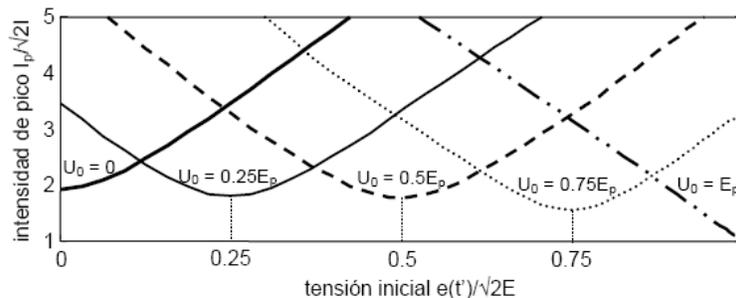


Ilustración 4. Evolución del valor de pico de la corriente de conexión ($I_p/\sqrt{2}I$) en función de la tensión en el instante de conexión ($e(t')/\sqrt{2}E$) para distintos valores de la tensión residual U_0 .

Empleando la estrategia de conexión en $e(t') = U_0$, la situación más desfavorable se produce cuando $U_0 = 0$, donde, en el ejemplo anterior, la corriente de pico I_p es cerca de dos veces el valor de pico de la corriente estacionaria $\sqrt{2}I$ (ver Ilustración 5). (2)

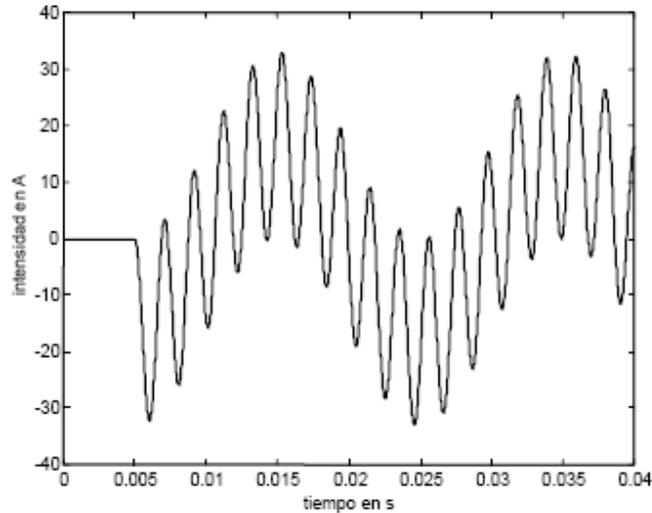


Ilustración 5. Intensidad en de conexión en un TSC cuando $e(t') = U_0 = 0$.

Con el TSC se eliminan los interruptores empleados en el esquema de la Ilustración 6, de esta forma la conexión y desconexión de la batería es prácticamente instantánea y se suprimen las corrientes de conexión. No obstante, con este elemento la capacidad de regulación de la reactiva dependerá nuevamente del número de escalones empleado.

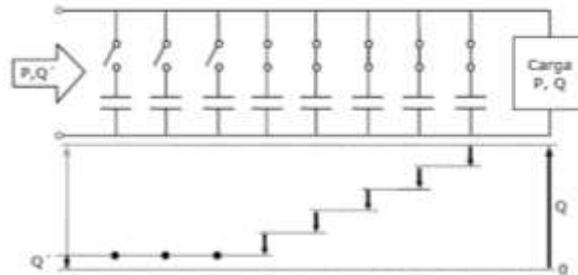


Ilustración 6. Compensación de reactiva mediante una batería automática de condensadores.

1.2.2. BOBINA CONTROLADA POR TIRISTORES (TCR)

Otro elemento característico en los SVC es la bobina controlada por tiristores. La principal misión de este elemento es la de conseguir una regulación continua y rápida de la potencia reactiva consumida por una bobina. (2)

El esquema de un TCR (ver Ilustración 7) está formado por una bobina (R+L) y un convertidor CA/CA compuesto por dos tiristores en antiparalelo. En este caso, a la electrónica de potencia se le aplica un control de fase, de forma que se regula el valor eficaz de la corriente que circula a través de la reactancia. (2)

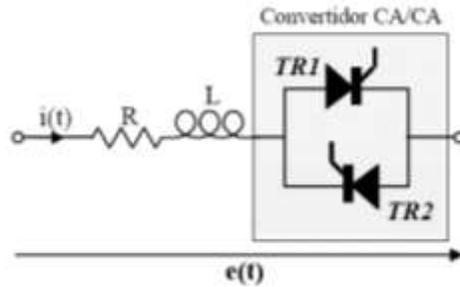


Ilustración 7. Configuración de un TCR.

Si en vez de realizar un control de fase, los tiristores se emplean como si fuesen un interruptor estático, la configuración descrita recibe el nombre de bobina conmutada por tiristores. Para minimizar los transitorios de desconexión el instante más favorable sería cuando la tensión de alimentación alcanzase su nivel máximo o mínimo. (2)

Al aplicar el control de fase sobre los tiristores, se consigue que vayan conduciendo alternativamente de forma que la intensidad resultante es una sucesión de transitorios sobre un conjunto RL. Esto es lo que se puede ver en la Ilustración 8, donde a partir de un instante definido por el ángulo de disparo α se inicia la conducción de cada uno de los tiristores TR1 y TR2.

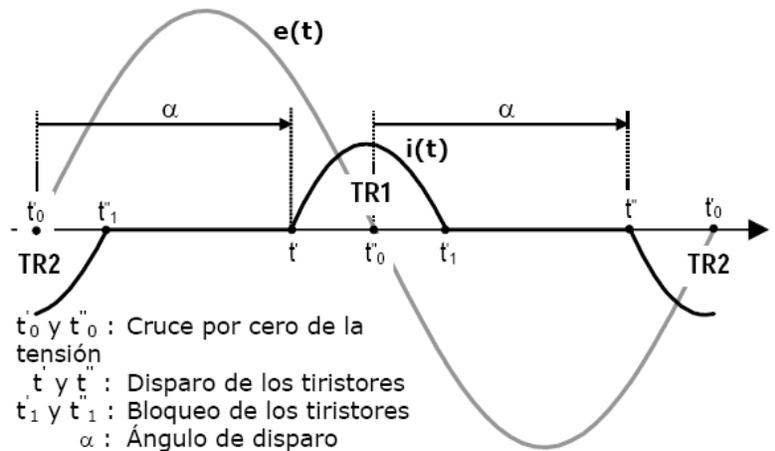


Ilustración 8. Formas de onda de intensidad en un TCR.

Si se necesita hacer un cálculo más exacto del comportamiento del TCR se tendrían que considerar los posibles armónicos en la tensión de red, habría que tener en cuenta los tiempos de conmutación de los tiristores y la resistencia óhmica de la bobina. (2)

Un problema que se puede presentar en un TCR es la aparición de armónicos de orden par en el caso de que los tiempos de disparo de los tiristores TR1 y TR2 sean distintos, tal y como se muestra en la Ilustración 9. (2)

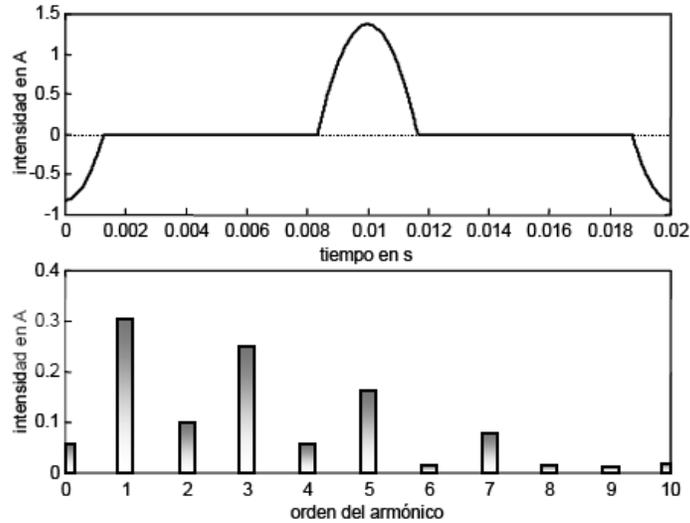


Ilustración 9. Forma de onda y espectro armónico para un TCR con un ángulo de disparo de 150° y con un 5% de diferencia entre el ángulo de disparo de TR1 y el de TR2.

1.2.2.1. Configuración Trifásica del TCR

En cuanto a las configuraciones trifásicas, sólo el TCR merece un estudio particular en cuanto a los armónicos o el margen de funcionamiento, ya que tanto el TSR como el TSC tienen un comportamiento fácilmente deducible. (2)

En la Ilustración 10 pueden verse las posibles configuraciones trifásicas (triángulo y estrella) de un TCR, aunque es habitual que la configuración empleada sea en triángulo. (2)

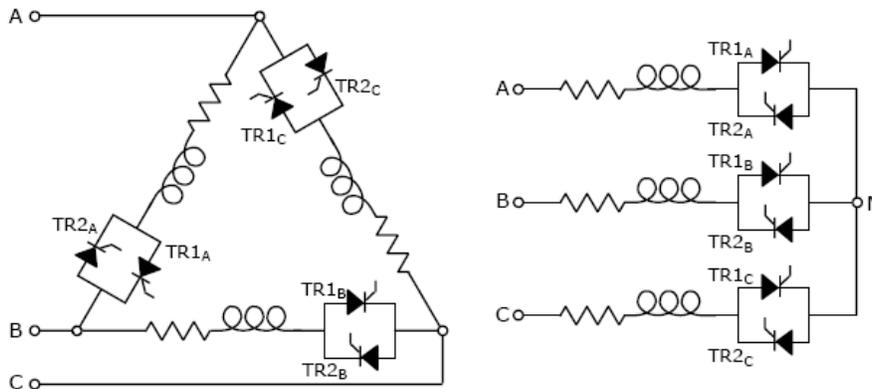


Ilustración 10. Configuraciones trifásicas del TCR.

Si se supone un sistema de tensiones sinusoidales, trifásico y equilibrado y además todos los tiristores se disparan con el mismo ángulo, las intensidades de línea presentan las siguientes características:

- Sólo hay armónicos impares.
- El caso de una configuración en estrella con neutro aislado, no existen componentes armónicas homopolares ($h = 3, 9, 15, \dots$), en cambio, si la conexión es en estrella con neutro sí que aparecen dichas componentes.
- En el caso de configuración en triángulo, los armónicos homopolares en la intensidad de línea son nulos.

El margen de variación del ángulo de disparo en la configuración en triángulo o en estrella con neutro es idéntico al del caso monofásico, ya que el funcionamiento de cada una de las ramas es independiente, de forma que se puede estudiar como si fuesen tres ramas monofásicas. De esta forma, el margen de variación sería:

$$\varphi (\approx \pi/2) < \alpha < \pi \quad (5)$$

Por ese mismo motivo, las formas de onda por fase, que no las de línea (Ilustración 12), de ambas configuraciones son idénticas, y por lo tanto, la evolución de la componente fundamental de la intensidad en función del ángulo de disparo es la misma (ver Ilustración 11).

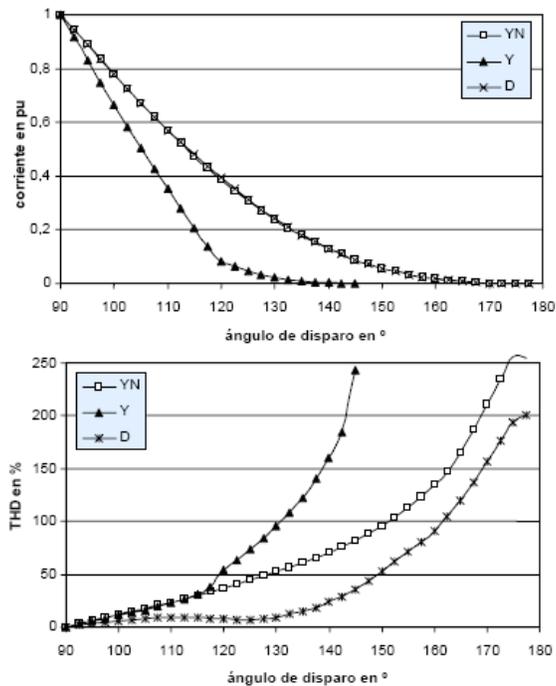


Ilustración 11. Evolución de la componente fundamental de la intensidad de línea y de su THD en función del ángulo de disparo para un TCR en estrella con neutro (YN), en estrella con neutro aislado (Y) y en triángulo (D)

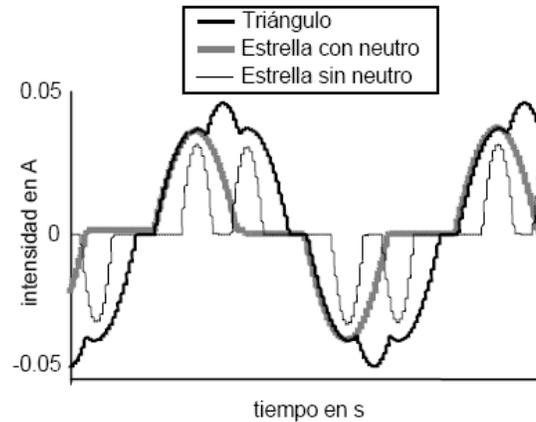


Ilustración 12. Intensidades de línea en un TCR trifásico para un ángulo de disparo $\alpha = 160^\circ$

En el caso de la configuración en estrella con neutro aislado el funcionamiento es distinto (ver Ilustración 11 e Ilustración 12), ya que para haya circulación de corriente es necesario que conduzcan al menos dos ramas. El intervalo de funcionamiento para esta la configuración es:

$$\varphi(\approx 90^\circ) < \alpha < 5\pi/6 (150^\circ) \quad (6)$$

1.3. APLICACIONES DEL SVC

Dentro de las aplicaciones de los SVC destacan (2):

- Control de la tensión para aumentar la calidad del suministro permitiendo, por ejemplo, mitigar la aparición de flicker cuando existen hornos de arco.
- Desde el lado del transporte de energía eléctrica se emplean para mejorar la estabilidad y la capacidad de transporte de las líneas de transporte.
- El SVC se puede poner en paralelo con un determinado consumo cuyo comportamiento varíe rápidamente para obtener un factor de potencia cercano a la unidad en todo instante.
- En el caso de consumos monofásicos variables, como es el caso de la tracción en trenes eléctricos, el SVC se usa para equilibrar el consumo en cualquier régimen de funcionamiento.

A continuación se explican las aplicaciones más típicas, como son la del control de tensión y corrección del factor de potencia, así como las configuraciones posibles.



Ilustración 13. SVC fabricado por Alstom de +30/-25MVar en 66kV.

1.3.1. CONFIGURACION DEL SVC

En general un SVC puede estar compuesto por todos o algunos de los elementos mostrados en la Ilustración 14. De esta forma, el SVC tiene un comportamiento capacitivo o inductivo en función del estado de operación de las distintas unidades de capacidad (TSC o controladas mecánicamente), del TCR y de la dimensión de los condensadores fijos, ya sea en baterías o filtros LC. (2)

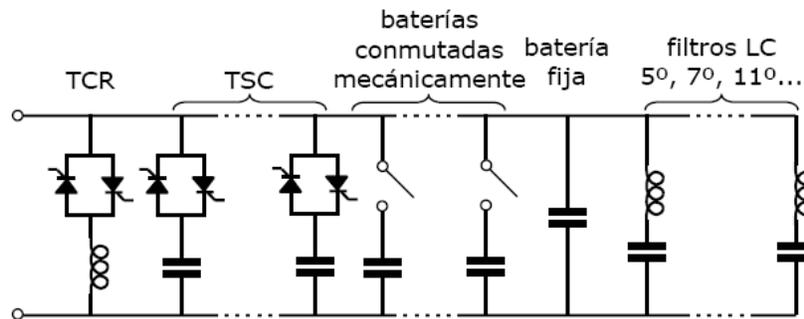


Ilustración 14. Composición por fase de un SVC.

La utilización de unidades TSC en paralelo con el TCR permite disminuir la su inductancia para el funcionamiento en el lado capacitivo, ya que el TCR sólo tendría que cubrir el salto de reactiva entre dos escalones del TSC. Al reducir el tamaño del TCR también disminuirían los armónicos inyectados por éste a la red. En la Ilustración 15 se puede ver el comportamiento de un SVC formado por TCR más TSC's en función de una potencia reactiva demandada (Q_{ref}).

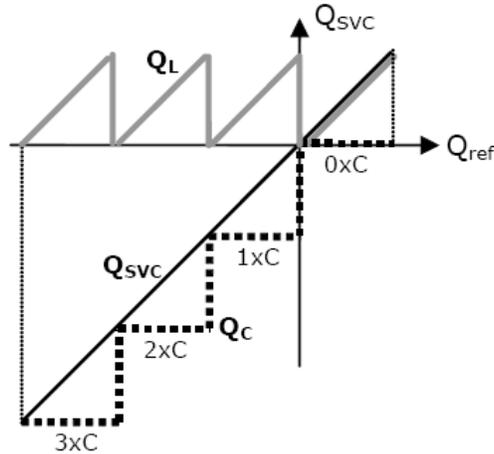


Ilustración 15. Evolución de la reactiva generada por un SVC formado por TSC+TCR.

La inclusión de filtros LC, ya sea sintonizados a un determinado armónico o bien paso-bajo, sirven para evitar que parte de los armónicos generados en el TCR se transmitan a la red. Con objeto de reducir los armónicos emitidos por el SVC también se pueden emplear estrategias como las del rectificador de 12 pulsos, dividiendo el SVC en dos y conectando cada parte a un transformador YY e YD.

Las baterías de condensadores, o inductancias, accionadas mecánicamente pueden trabajar como unidades de reactiva de reserva que entrarían en funcionamiento en aquellas condiciones más severas para el control realizado por el SVC.

1.3.2. CONTROL DE TENSIÓN Y CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Para analizar el comportamiento de un SVC en control de tensión y corrección del factor de potencia se empleará el circuito mostrado en Ilustración 16; donde U es la tensión en el consumo, E es la tensión de suministro, P y Q representan el consumo de la carga y Q_{SVC} es la potencia reactiva generada por el SVC. (2)

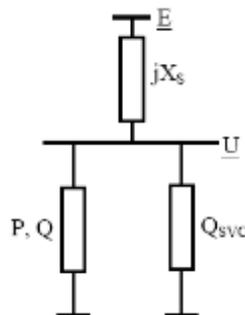


Ilustración 16. Circuito Equivalente.

La caída de tensión ΔU en el consumo se puede poner como:

$$\Delta U = E - U = jX_s \frac{P - j(Q - Q_{SVC})}{U} \quad (7)$$

donde se ha tomado como referencia la tensión $U = U \angle 0$, E es la tensión de suministro y $Q_{SVC} = B_{SVC} U^2$.

Utilizando la ecuación (12), se puede poner el valor eficaz de la tensión en el suministro como:

$$E^2 = \left[U + \frac{X_s(Q - Q_{SVC})}{U} \right]^2 + \left[\frac{X_s P}{U} \right]^2 \quad (8)$$

El valor de Q_{SVC} que se requeriría para mantener constante la tensión se obtendría de la ecuación (13) con la condición de $E = U$. Por otra parte, si lo que se desea es hacer una corrección del factor de potencia, dicho valor sería $Q_{SVC} = Q$. De lo que se deduce que no se pueden controlar la tensión y el factor de potencia simultáneamente.

A continuación se muestran aplicaciones de control de tensión y de factor de potencia mediante la utilización de SVC.

1.3.3. CONTROL DE TENSION MEDIANTE SVC

El SVC se desarrolló a principios de los años 70 para el control de la tensión en puntos de la red en los que hubiese hornos de arco de eléctrico. Este tipo de horno se carga con chatarra de acero en la que se introducen unos electrodos. Al aplicarse la corriente eléctrica, la formación del arco entre los electrodos produce un calor intenso que funde el acero. Durante el proceso de fundición se producen unas variaciones bruscas y de carácter aleatorio en la corriente que se consume. De esta forma, el resto de los consumos conectados a la red en paralelo con el horno pueden padecer unas variaciones de tensión indeseables, por ejemplo, en forma de *flicker*. (2)

El principio de funcionamiento del SVC, basado en electrónica de potencia, se adapta perfectamente a este tipo de situaciones, ya que se puede realizar un control progresivo y rápido de la tensión, o sea de la reactiva, en el punto de la red en el que se desee actuar.

En estas situaciones en las que la variable de control es la tensión, la actuación sobre el SVC se puede realizar a través de un regulador que actúe sobre el ángulo de disparo del TCR y que conecte o desconecte las unidades de TSC en función de la desviación de la tensión con respecto a la tensión de referencia, tal y como se muestra en la Ilustración 17.

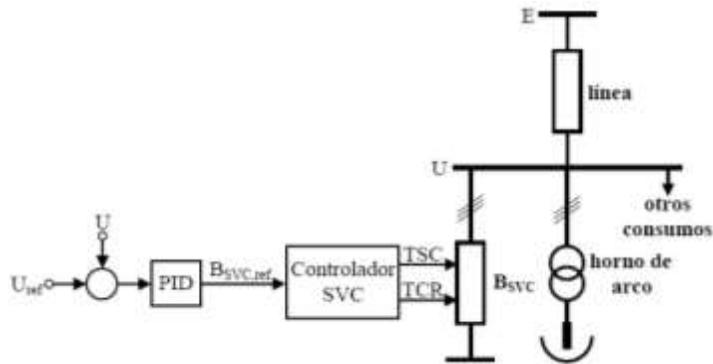


Ilustración 17. Configuración para el control de la tensión mediante un SVC.

A continuación se muestra un ejemplo de simulación de la aplicación de un SVC para el control de la tensión, cuando se conectan y desconectan las cargas mostradas en Ilustración 18 de la siguiente manera:

- $t = 0 \text{ s}$ La Carga 1 está conectada y la Carga 0 está desconectada
- $t = 2.0 \text{ s}$ Se conecta la Carga 0
- $t = 2.5 \text{ s}$ Se desconecta la Carga 0
- $t = 2.6 \text{ s}$ Se desconecta la Carga 1
- $t = 3.5 \text{ s}$ Se conecta la Carga 1

Para el control se utiliza un PID cuya salida es directamente el valor de la susceptancia del SVC. La variación de la tensión en el nudo de las cargas con y sin SVC se puede ver en la Ilustración 19, además de la evolución de la susceptancia del SVC (B_{SVC}).

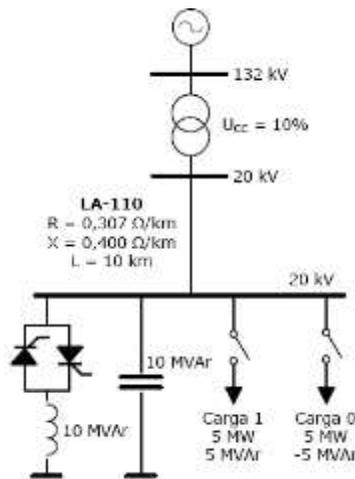


Ilustración 18. Circuito ejemplo de control de tensión con un SVC.

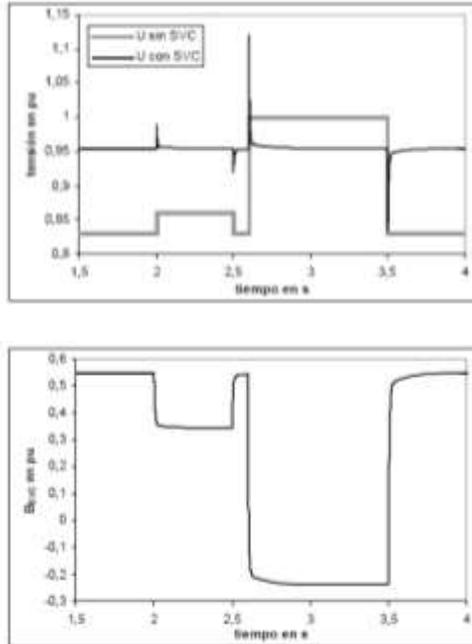


Ilustración 19. Tensión en las cargas y susceptancia del SVC.

Los dispositivos basados en SVC se pueden emplear en los sistemas de transporte de la energía eléctrica para aumentar la capacidad de transporte y estabilidad de las líneas de transporte. Considérese el ejemplo de la Ilustración 20, en donde se representa una línea de transporte modelada como una reactancia serie X la cual está conectada a dos fuentes de tensión con un cierto desfase δ . En estas condiciones la potencia que se puede transportar viene dada por la expresión (ver Ilustración 21):

$$P = \frac{U^2}{X} \delta \quad (9)$$

de donde la potencia máxima que se puede transferir es:

$$P_{max} = \frac{U^2}{X} \quad (10)$$

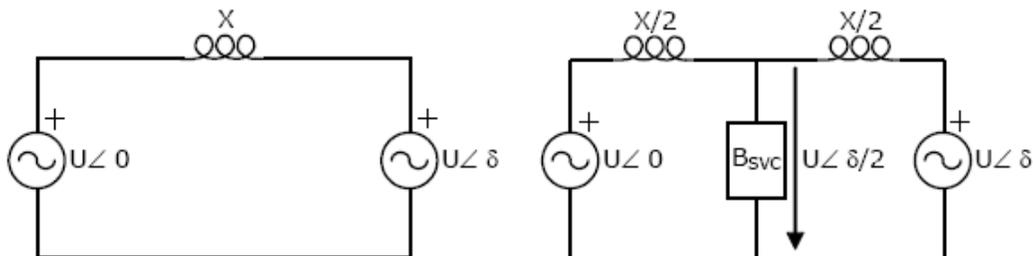


Ilustración 20. Aplicación del SVC en líneas de transporte.

Para aumentar la capacidad de transporte de la línea se puede incluir en su punto medio (ver Ilustración 20) un SVC de forma que el valor eficaz tensión en ese punto sea igual al de sus extremos. De esta forma si aplicamos la expresión (15) a cada una de las partes en que ha quedado dividida la línea se obtiene una potencia máxima:

$$P'_{max} = 2 \frac{U^2}{X} \quad (11)$$

donde se puede comprobar que $P'_{max} = 2P_{max}$.

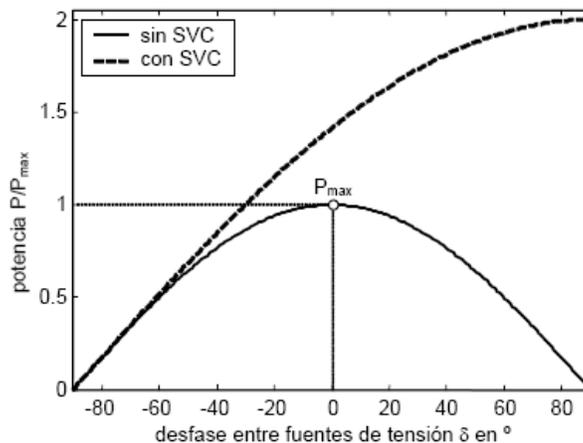


Ilustración 21. Evolución de la potencia en una línea de transporte en función del desfase δ entre las fuentes de tensión conectadas a sus extremos

La aplicación en los sistemas de transporte de energía eléctrica de los sistemas como el mostrado, es decir, basados en electrónica de potencia, es lo que se viene llamando *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS). Dentro de este concepto entrarían el SVC, HVDC, STATCOM.

1.3.4. CORRECCION DE FACTOR DE POTENCIA MEDIANTE SVC

La utilización del TSC para el control del factor de potencia en aquellas aplicaciones donde se desee minimizar los transitorios de conexión es bastante habitual. No obstante, el comportamiento de estos equipos de puede mejorar incluyendo un TCR en el diseño, de forma que la regulación del factor de potencia sea continua. (2)

El control de estos equipos puede realizarse en bucle abierto midiendo la potencia reactiva consumida por la carga y actuando sobre el SVC o bien en bucle cerrado midiendo la potencia reactiva consumida por el conjunto formado por la carga a compensar y el SVC. Sin embargo, el emplear la potencia reactiva como variable entrada no está exenta de problemas, ya que es necesaria la medida simultánea de la tensión y la intensidad, además de la problemática que acarrea su definición cuando hay armónicos en la red.

Si se atiende al comportamiento de la intensidad (ver Ilustración 22), su valor para el conjunto de la carga más el compensador se puede poner de forma aproximada como:

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + (Q - Q_{SVC})^2}}{E} \quad (12)$$

donde P y Q son, respectivamente, las potencias activa y reactiva demandadas por la carga, Q_{SVC} es la reactiva generada por el SVC y E es el valor eficaz de la tensión de red. Según este comportamiento, el control del SVC se puede realizar de forma que se busque el valor mínimo de la intensidad.

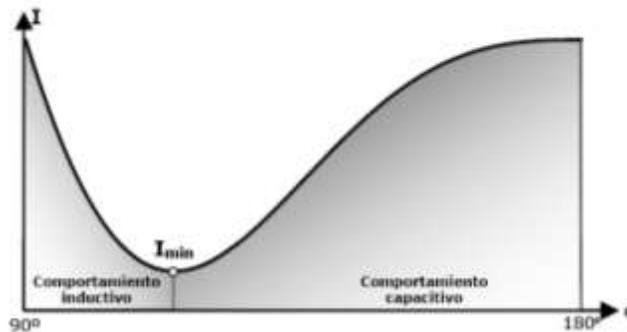


Ilustración 22. Evolución de la intensidad eficaz consumida por el conjunto del compensador más la carga en función del ángulo de disparo

2. MARCO REGULATORIO

Para llevar a cabo un buen análisis financiero es necesario conocer la normatividad aplicable al proyecto en estudio y así evaluar las implicaciones tanto negativas como positivas económicamente.

El factor de potencia es un estándar que depende de la carga conectada por el usuario. Por lo tanto, es él quien deberá mantenerlo en niveles que no causen dificultades en la red; existe una reglamentación para tener en cuenta el efecto del

consumo de reactivos que supere el 50% de la potencia activa, por parte de un usuario final. (3)

Los códigos, normas y estándares presentados a continuación son documentos y publicaciones reconocidos a nivel nacional e internacional, realizados y avalados por especialistas, que definen los lineamientos y buenas prácticas de instalación y operación de las instalaciones y equipos inspeccionados en este estudio. El cumplimiento de éstos es de suma importancia para asegurar el correcto funcionamiento del sistema eléctrico y de los equipos, brindar seguridad, disponibilidad y confiabilidad en las instalaciones y en los usuarios. Adicionalmente, en Colombia mediante Resolución del 6 de Agosto del 2008 expedida por el Ministerio de Minas y Energía establece y exige el pleno cumplimiento del RETIE, códigos y normas referenciadas en el mismo.

Otras normas de importancia:

- Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE.
- Norma Técnica Colombiana NTC – 2050. Código Eléctrico Colombiano.
- IEEE – 519. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- IEEE – 399. IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power systems Analysis.
- IEEE 1159. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- IEEE 1459. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.
- IEEE 1100. IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment.
- CREG 070 - 1998. Resolución de la Comisión Reguladora de Energía y Gas.
- CREG 108 - 1997. Resolución de la Comisión Reguladora de Energía y Gas.
- CREG 024 - 2005. Resolución de la Comisión Reguladora de Energía y Gas.

Las siguientes son una recopilación de aquellas normas que se relacionan directamente con el objeto de este estudio.

2.1. REGULACION VOLTAJE

Resolución CREG-025 de 1995: Sistema de control automático requerido para mantener el voltaje dentro del rango de operación. (4):

51.1. Tensión: El STN se planeará de tal forma que permita, en conjunto con la generación, los sistemas de transmisión regionales y los sistemas de distribución local, asegurar que la tensión en las barras de carga a nivel de

220 kV y superiores no sea inferior al 90% del valor nominal, ni superior al 110%.

Resolución CREG-070 de 1998: El Código de Distribución determinó, como estándar de calidad para el suministro de potencia por parte del OR, el cumplimiento de las tensiones límites establecidas en la norma NTC 1340. (5)

2.2. FACTOR DE POTENCIA

RESOLUCIÓN CREG 108 DE 1997 (6):

Artículo 25°. Control al factor de potencia en el servicio de energía eléctrica. En la prestación del servicio público domiciliario de energía eléctrica, se controlará el factor de potencia de los suscriptores o usuarios no residenciales, y de los residenciales conectados a un nivel de tensión superior al uno.

Parágrafo 1°. El factor de potencia inductiva (coseno phi inductivo) de las instalaciones deberá ser igual o superior a punto noventa (0.90). La empresa exigirá a aquellas instalaciones cuyo factor de potencia inductivo viole este límite, que instalen equipos apropiados para controlar y medir la energía reactiva.

Parágrafo 3°. A partir de la vigencia de la presente resolución, y hasta tanto la Comisión reglamente el suministro y consumo de energía reactiva en el Sistema Interconectado Nacional, en caso de que la energía reactiva sea mayor al cincuenta por ciento (50%) de la energía activa (kWh) consumida por un suscriptor o usuario, el exceso sobre este límite se considerará como consumo de energía activa para efectos de determinar el consumo facturable. (Ver Res. CREG 82/02 art. 11)

RESOLUCIÓN CREG 082 de 2002:

Artículo 13: Que para el establecimiento de las pérdidas a reconocer por operador de red, la comisión contrato la consultoría para la determinación de las pérdidas de energía en los mercados de comercialización presentes en el SIN y definición de criterios para la evaluación de planes de reducción y/o mantenimiento de pérdidas de energía, con la firma IEB ingeniería especializada S.A y el documento final fue publicado en la página web de la CREG con la circular 024 del 11 de marzo de 2008, mediante la cual se divulgaron los resultados obtenidos por el consultor. (7)

2.3. ARMONICOS EN LA RED

Resolución CREG-025 de 1995: Sistema de control automático requerido para mantener el voltaje dentro del rango de operación. (4):

5.1.2. Armónicos: Las formas de onda de tensión y corriente, con respecto al contenido de armónicos y desbalance de fases, cumplirán los requisitos establecidos por la NTC (Norma Técnica Colombiana) respectiva. Mientras no exista NTC aplicable, se utilizará la Norma ANSI/IEEE 519.

El Código de Planeamiento del Código de Redes especifica los estándares para el planeamiento y desarrollo del STN, igualmente define los elementos de planeamiento aplicados a los análisis de estado estacionario y transitorio y los índices de confiabilidad. (4)

2.4. PENALIZACIONES

Resolución CREG 087 de 2010: Los agentes que incumplan los requisitos pagarán remuneraciones por exceso de transporte, acordes con el perjuicio causado al sistema y a los demás agentes y sanciones de las entidades competentes. Incluso, en algunos casos el incumplimiento de los requerimientos por parte de un agente puede acarrear su desconexión del sistema. (1)

Incumplimientos de los distribuidores y grandes consumidores: El incumplimiento con respecto al factor de potencia obligatorio deberá dar origen a una remuneración por parte de éstos, la cual será de acuerdo con el grado de desviación en el cumplimiento. Éste pago deberá remunerar a los agentes perjudicados con esta conducta. Para el caso, al estar conectados a las redes de transmisión, deberán reducir la tarifa que los usuarios pagan por este concepto.

2.5. REMUNERACIÓN POR ACTIVOS – CREG

Ley 143 de 1994: CAPÍTULO VIII. DE LAS TARIFAS POR ACCESO Y USO DE LAS REDES. (8)

ARTÍCULO 39. Los cargos asociados con el acceso y uso de las redes del sistema interconectado nacional cubrirán, en condiciones óptimas de gestión, los costos de inversión de las redes de interconexión, transmisión y distribución, según los diferentes niveles de tensión, incluido el costo de oportunidad de capital, de administración, operación y mantenimiento, en condiciones adecuadas de calidad y confiabilidad y de desarrollo sostenible. Estos cargos tendrán en cuenta criterios de viabilidad financiera.

ARTÍCULO 40. Las tarifas por el acceso y uso de las redes del sistema interconectado nacional deben incluir los siguientes cargos:

- a) Un cargo de conexión que cubrirá los costos de la conexión del usuario a la red de interconexión;
- b) Un cargo fijo asociado a los servicios de interconexión;
- c) Un cargo variable, asociado a los servicios de transporte por la red de interconexión;

ARTÍCULO 41. La Comisión de Regulación de Energía y Gas definirá la metodología del cálculo y aprobará las tarifas por el acceso y uso de las redes

del sistema interconectado nacional y el procedimiento para hacer efectivo su pago.

PARÁGRAFO 1o. Las tarifas de acceso a las redes se calcularán considerando entre otros factores, la ubicación de los centros de carga dentro de las redes regionales y los sistemas de distribución asociados, los costos reales del sistema de transmisión o de distribución que se requieren para atender cada centro de carga y las condiciones ambientales que puedan afectar la inversión y el mantenimiento.

En el análisis económico se considerará:

- La Resolución 034 de 2001
- La disminución del costo de restricciones por rentas de congestión.

Los recursos que aporta el OR para el servicio de potencia reactiva y control de tensiones se reconocen a través del esquema de remuneración de la actividad correspondiente, en la Resolución CREG 097 de 2008.

3. PLANTA DIACO DE ACEROS

Gerdau Diaco es líder en la producción de aceros largos en el Continente Americano y una de las principales proveedoras de aceros largos especiales del mundo. Es la más grande recicladora de Latinoamérica, y transforma anualmente millones de toneladas de chatarra en acero.

En Colombia, Gerdau Diaco cuenta con plantas productivas en Muña, Yumbo, Tocancipá, Duitama y Tuta; así como plantas que prestan servicio a constructores en Cota, Cartagena, Santa Marta, Barranquilla, Bucaramanga, Pereira, Medellín, Duitama, Ibagué, Manizales, Yumbo y Tocancipá. Gerdau Diaco es la empresa de acero de mayor cobertura a nivel nacional y principal reciclador de chatarra ferrosa; lo que contribuye al desarrollo sostenible del país. Cumple con la Norma Técnica Colombiana definida por ICONTEC, y sus aceros para la construcción civil cumplen con la calidad exigida en la Norma de Sismo resistencia NSR-10.

Para este proyecto en particular se estudiará la planta ubicada a 20 km de Bogotá en el municipio de Tocancipá en el departamento de Cundinamarca.



Ilustración 23. Ubicación geográfica de Tocancipá.

3.1. CARACTERISTICAS DEL SISTEMA ELÉCTRICO ACTUAL

La subestación DIACO es de un nivel de tensión 115 kV/34.5 kV/ 13.8 kV, con un factor de potencia actual de 0,894. A continuación se compila la información del sistema eléctrico y las características del sitio del proyecto.

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR
Tensión nominal	kV	13,8
Frecuencia asignada	Hz	60
Nivel básico de aislamiento asignado al impulso tipo rayo (BIL)	kV pico	110
Corriente asignada de cortocircuito para el equipo de subestación	kA	25
Altura sobre el nivel del mar	(m)	2640
Temperatura anual	-	-
• Máximo promedio anual	(°C)	18,8
• Media anual	(°C)	13,0
• Mínimo promedio anual	(°C)	8,2
Velocidad máxima del viento	(Km/h)	80
Nivel de contaminación	-	Pesado (IEEE 60815)
Nivel ceraunico	Días-año	180
Zona de amenaza sísmica	-	Intermedia
Coefficiente que representa aceleración horizontal pico efectiva Aa	G	0,15
Coefficiente que representa aceleración vertical pico efectiva Av	G	0,20
Radiación solar	W/m ²	1115

Tabla 1. Características eléctricas del sistema y del sitio del proyecto.

3.2. PROBLEMÁTICA Y METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA COMPENSACIÓN DE REACTIVOS

De acuerdo al análisis eléctrico de la Planta de aceros de DIACO, se evidenció la generación de problemas de caídas de tensión; originando salidas de circuitos pertenecientes a plantas aledañas a la zona lo que conlleva a la suspensión del servicio por varios minutos en el sector y, un factor de potencia bajo lo que repercute en sanciones para la empresa.

Los Operadores de Red reportan un listado con las subestaciones con factor de potencia inferior a 0,9 para la hora pico del día de máxima demanda nacional (ver Reporte subestaciones factor de potencia inferior a 0,9 Tabla 2). Con base en esta información la CREG verifica el cumplimiento de la normatividad y aplica las penalizaciones correspondientes.

Subestación	Factor de Potencia Reportado	Subestación	Factor de Potencia Reportado
Barzal	0.881	Antioquia	0.899
Chicala	0.894	Malena	0.881
Colegio	0.892	Poblado	0.891
Díaco	0.894	Boavita	0.877
Muña	0.745	Chiquinquirá	0.740
Noroeste	0.899	Banadía	0.886
Ocoa	0.745	La insula	0.893
Tenjo	0.872	San mateo	0.893
Villavicencio	0.897	Zulia	0.851
Cuba	0.862	Bucaramanga	0.883
Enea	0.899	Palenque	0.896
Mariquita	0.899	Palos	0.890
Las Flores	0.870	San gil	0.784
Bayunca	0.890	Flandes	0.892
Tenera	0.898	Florencia	0.892
Montería	0.886	Lancersos	0.898
Coveñas	0.802	Neiva	0.899
Santa marta	0.834	Sesur	0.853

Tabla 2. Reporte subestaciones factor de potencia inferior a 0,9

En caso de que la energía reactiva sea mayor al cincuenta por ciento (50%) de la energía activa (kWh) consumida por un suscriptor o usuario, el exceso sobre este límite se considerará como consumo de energía activa para efectos de determinar el consumo facturable.

SECTOR NO RESIDENCIAL								
			NIVEL 1 PROPIEDAD DE CODENSA (\$/kWh)	NIVEL 1 PROPIEDAD DEL CLIENTE (*) (\$/kWh)	NIVEL 1 PROPIEDAD COMPARTIDA (*) (\$/kWh)	NIVEL 2 (11.4 y 13.2 kV) (\$/kWh)	NIVEL 3 (34.5 kV) (\$/kWh)	NIVEL 4 (115 kV) (\$/kWh)
OFICIAL E INDUSTRIAL SIN CONTRIBUCIÓN	SENCILLA	Monomía	355,1080	325,0913	340,0997	281,6835	254,5477	219,1797
	OPCIONES HORARIAS (**)	Punta	359,7142	329,6975	344,7059	285,6781	255,4926	218,9975
		Fuera de Punta	353,6827	323,6660	338,6744	280,4551	253,1154	222,0771
INDUSTRIAL Y COMERCIAL CON CONTRIBUCIÓN	SENCILLA	Monomía	426,1296	390,1096	408,1196	338,0202	305,4572	263,0156
	OPCIONES HORARIAS (**)	Punta	431,6570	395,6370	413,6471	342,8137	306,5911	262,7970
		Fuera de Punta	424,4192	388,3992	406,4093	336,5461	303,7385	266,4925
INDUSTRIAL SIN CONTRIBUCIÓN	DOBLE HORARIA	Nocturna	360,2049	330,1882	345,1966	286,2293	259,2267	
		Diurna	353,4879	323,4712	338,4796	280,2427	252,8133	
INDUSTRIAL CON CONTRIBUCIÓN	DOBLE HORARIA	Nocturna	432,3459	396,2258	414,2359	343,4752	311,0720	
		Diurna	424,1855	388,1654	406,1755	336,2912	303,3760	

Tabla 3. Tarifas de CODENSA sector no residencial

3.2.1. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA COMPENSACIÓN DE REACTIVOS

CODENSA exigirá a aquellas instalaciones cuyo factor de potencia inductivo viole el límite de 0.9 que, instalen equipos apropiados para controlar y medir la energía reactiva.

Con el fin de obtener una solución DIACO contempla la realización del proyecto de compensación SVC donde se instalará:

1. Un banco de reactores de 70Mvar controlado por tiristores (estos últimos se instalaran en un contenedor)
2. Un filtro de 120 Hz y 14 Mvar a la tensión de operación.
3. Un filtro de 180 Hz y 25 Mvar a la tensión de operación.
4. Un filtro de 240 Hz y 21 Mvar a la tensión de operación.

Los anteriores equipos serán instalados en un área aledaña a la subestación que alimenta la planta industrial DIACO. Para la alimentación de estos equipos se utilizarán dos celdas de 13,8 kV que se encuentran en la subestación existente.



Ilustración 24. Diseño final

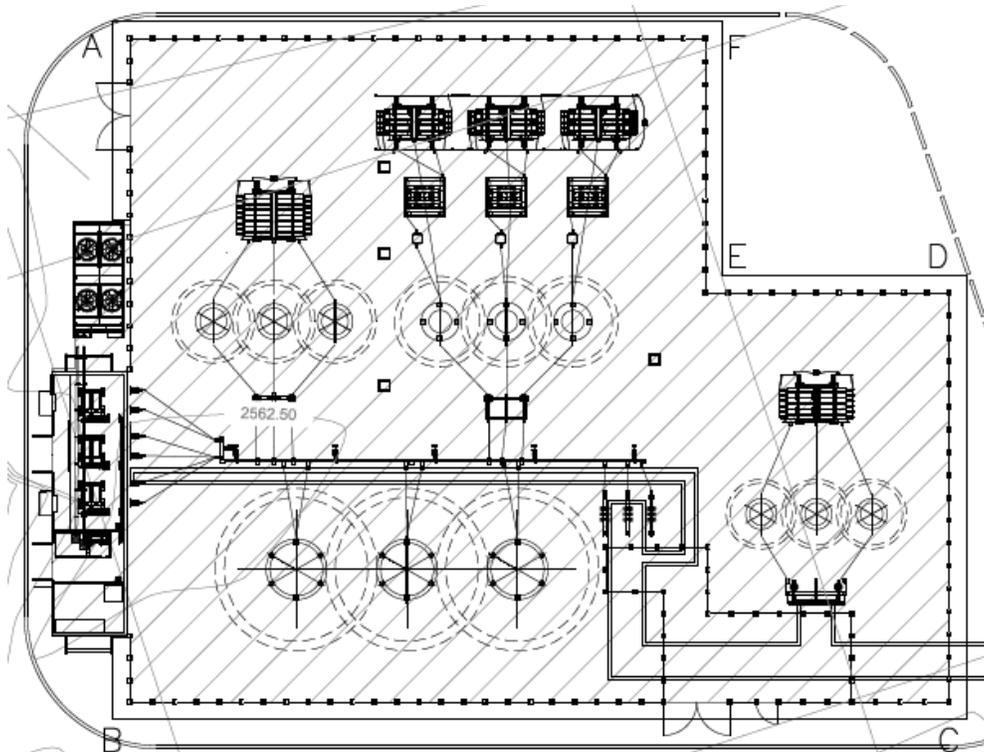


Ilustración 25. Planos diseño final

4. PARAMETROS ECONOMICOS DEL PROYECTO

La decisión final en cuanto a instalar un sistema SVC recae sobre el análisis económico. La evaluación del proyecto compara mediante distintos instrumentos, si el flujo de caja proyectado permite la rentabilidad deseada, además de recuperar la inversión. Los métodos más comunes corresponden a los denominados Valor Presente Neto, la Tasa Interna de Retorno, el período de recuperación, la relación Beneficio/Costo y el Rendimiento por Unidad de Inversión.

4.1. ESTIMACION DE INVERSIONES DE LOS EQUIPOS

El estimar correctamente los costos de inversión es la parte principal de un estudio de factibilidad, ya que no considerar algún costo, puede llevar a conclusiones erróneas, además, pueden encontrarse dificultades con el flujo de recursos financieros durante el desarrollo del proyecto. Para realizar el estudio de viabilidad o un análisis económico, se necesita saber el costo para construir y operar el sistema. Los costos de capital o costo inicial, consisten en el costo del equipo principal, costo de la instalación y del proyecto, llamado también costo de ingeniería y gerencia, comprende.

Los costos directos tienen relación con el costo del equipo principal, son los más importantes del sistema y es el rubro más grande; corresponden a los elementos que comprende el sistema de compensación estático de reactiva.

Proyecto pionero en el país en la compensación de energía reactiva en la industria del acero, con un tiempo de construcción de 7 meses, periodo de análisis de operación de 4,4 años y un presupuesto de 6.481.317.498,00

PRESUPUESTO PROYECTO DIACO		
VALOR DEL EQUIPO	\$	3.990.000.000
COMPENSACION SVC		
INSTALACION Y MONTAJE	\$	2.490.747.498
MANTENIMIENTO		\$
		570.000.000
TOTAL	\$	6.481.317.498

Tabla 4. Presupuesto proyecto DIACO.

4.2. COSTOS DE OPERACIÓN

Los costos de operación del SVC están divididos en dos categorías, los costos directos y los costos indirectos.

COSTOS DIRECTOS	
Materiales	
Malla puesta en tierra	26.317.443
Apantallamiento	10.778.423
Cableado de Potencia	396.144.828
Iluminación y sistema eléctrico	106.263.887
Ductos	3.148.545
Obra Civil	1.266.294.372
TOTAL MATERIALES	1.808.947.498
Mano de obra	
Nómina de empleados e ingenieros	190.000.000
Subcontratos	250.000.000
Dotaciones	10.000.000
TOTAL MANO DE OBRA	450.000.000
Equipo y Herramienta	
Herramientas menores	6.000.000
Alquiler de equipos menores	800.000
Alquiler Contenedores	5.000.000
Alquiler Baño	4.000.000
Grúa	50.000.000
TOTAL EQUIPO Y HERRAMIENTA	65.800.000
Transporte de Personal	
Transporte de personal	10.000.000
TOTAL TRANSPORTE	10.000.000
TOTAL COSTOS DIRECTOS	2.334.747.498

COSTOS INDIRECTOS	
Planos As- Built	2.000.000
Computadores y Papelería	3.000.000
Comunicaciones	4.000.000
Alimentación y Vivienda	70.000.000
Alquiler Camioneta	20.000.000
Pólizas e Imprevistos	30.000.000
Caja Menor	25.000.000
4 X 1000	2.000.000
TOTAL COSTOS INDIRECTOS	156.000.000

COSTOS TOTALES DEL PROYECTO 2.490.747.498

Tabla 5. Costos totales proyecto DIACO SVC.

4.3. PAUTAS DEL PROYECTO

Periodo de operación (años)	5
Valor de salvamento (% de inversión/100)	0,60
Financiación	0,10
Tasa de interés anual del préstamo (%/100)	0,14
Imporenta+ CREE (%/100)	0,34
Depreciación (línea recta anual) 10 años	0,10
Rendimiento mínimo atractivo (WACC)	15%
Ingresos proyectados por disminución de sanciones	2.100.000.000,00

Incremento ingresos	5%
Incremento gastos de mantenimiento	5%

Tabla 6. Pautas del proyecto de Compensación SVC.

5. EVALUACION ECONOMICA DEL PROYECTO

5.1. VALOR PRESENTE NETO (VPN)

En este método los costos y réditos futuros son convertidos o descontados al presente. Descontar reconoce que estos costos y réditos del futuro tienen más riesgo y así no vale tanto en el dinero de hoy. La tasa de descuento usada se basa en lo que se ha establecido como una tasa aceptable de retorno por la compañía, esta es usualmente llamada costo de capital. Es la diferencia entre los ahorros netos totales durante un período determinado y la inversión neta para el mismo período. A esta diferencia se le conoce como flujo de caja, la cual se evalúa a un valor presente. El VPN del proyecto se calcula conforme a la siguiente expresión (4):

$$VPN = \sum_{j=0}^N \frac{F_j}{(1+i)^j}$$

en donde:

- F_j: Flujo de caja en el período j.
- N: Número de períodos.
- i: Tasa de rentabilidad o de descuento.

El VPN resultante debe ser superior a cero. Si el valor presente neto de la opción de inversión es positivo, significa que el total del ingreso neto descontado o ahorro es mayor que los desembolsos de capital, entonces el proyecto tendrá un impacto positivo en las ganancias de la compañía. El valor presente neto toma en cuenta todos los costos y réditos del futuro.

5.2. TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

Es un método derivado del método de valor presente neto, con el cual, la tasa de descuento varía hasta que el ingreso del precio neto o el ahorro sea igual a la inversión y el valor presente del precio neto se vuelve cero. Si la tasa de descuento resultante es mayor que el costo de capital, entonces el proyecto aumentará la rentabilidad del negocio. Este método permite la comparación de cada tipo de opción de inversión, que significa que todas las opciones de la inversión pueden ser ordenadas por su tasa interna de retorno, empezando con el proyecto que del valor más alto. La TIR se calcula con la siguiente expresión (4):

$$0 = \sum_{j=0}^N \frac{F_j}{(1+TIR)^j}$$

Si se relaciona la TIR con el costo de capital se dirá que si el WACC es menor que la TIR esto es atractivo, si WACC = TIR sería indiferente y si WACC es mayor que TIR no sería atractivo. Luego se puede interpretar la TIR como el límite del Costo de Capital para que el inversionista no pierda o no gane.

5.3. RECUPERACION DE LA INVERSION

Determina el número de años requeridos para que el capital invertido sea cubierto por los beneficios resultantes, incluyendo el costo de capital involucrado, lo que se desea encontrar es el número de años R, para los cuales el valor de la siguiente expresión es igual a cero (4):

$$C = \sum \frac{B_j - P_j}{(1+i)^j}$$

donde:

- C: Costo de la inversión inicial.
- B_j: Beneficios en el año j.
- P_j: Costos en el año j.
- i: Tasa de descuento.
- j: Año.

5.4. RENDIMIENTO POR UNIDAD DE INVERSION (IVAN)

Se utiliza en la priorización de proyectos de inversión, cuyo criterio de decisión es el de escoger el proyecto con un mayor índice, se calcula con la siguiente ecuación

$$IVAN = \frac{VPN}{INVERSION}$$

6. DESARROLLO DE LA EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO

6.1. ESCENARIO A. FLUJO DE CAJA PROYECTO CON RECURSOS PROPIOS

CÁLCULOS CON RECURSOS PROPIOS - SIN FINANCIACIÓN						
Flujo Neto de Caja Sin Financiación	0	1	2	3	4	5
(+) Ingresos		\$ 2.100.000.000,00	\$ 2.205.000.000,00	\$ 2.315.250.000,00	\$ 2.431.012.500,00	\$ 2.552.563.125,00
(-) Gastos de mantenimiento		\$ 570.000,00	\$ 598.500,00	\$ 628.425,00	\$ 659.846,25	\$ 692.838,56
(-) Depreciaciones y Amortizaciones		\$ 399.000.000,00	\$ 399.000.000,00	\$ 399.000.000,00	\$ 399.000.000,00	\$ 399.000.000,00
(=) U .A.I.I.	\$ -	\$ 1.700.430.000,00	\$ 1.805.401.500,00	\$ 1.915.621.575,00	\$ 2.031.352.653,75	\$ 2.152.870.286,44
(-) Intereses préstamos		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
(=) Utilidad Antes de Impuestos	\$ -	\$ 1.700.430.000,00	\$ 1.805.401.500,00	\$ 1.915.621.575,00	\$ 2.031.352.653,75	\$ 2.152.870.286,44
(-) Impuestos		\$ 578.146.200,00	\$ 613.836.510,00	\$ 651.311.335,50	\$ 690.659.902,28	\$ 731.975.897,39
(=) Utilidad después de Imp.	\$ -	\$ 1.122.283.800,00	\$ 1.191.564.990,00	\$ 1.264.310.239,50	\$ 1.340.692.751,48	\$ 1.420.894.389,05
(+) Depreciaciones y Amortizaciones		\$ 399.000.000,00	\$ 399.000.000,00	\$ 399.000.000,00	\$ 399.000.000,00	\$ 399.000.000,00
= FLUJO DE CAJA DE LA OPERACIÓN	0	\$ 1.521.283.800,00	\$ 1.590.564.990,00	\$ 1.663.310.239,50	\$ 1.739.692.751,48	\$ 1.819.894.389,05
(-) Inversiones						
Equipo Compensación SVC	\$ 3.990.000.000,00					
Materiales	\$ 1.808.947.498,02					
Mano de obra	\$ 450.000.000,00					
Equipo y herramienta	\$ 65.800.000,00					
Transporte de personal	\$ 10.000.000,00					
Costos indirectos	\$ 156.000.000,00					
Gastos de puesta en marcha	\$ -					
(+) Recursos de Crédito						
(-) Pago Capital Créditos						
Valor de salvamento						\$ 2.258.340.000,00
FLUJO NETO DE CAJA	\$ (6.480.747.498,02)	\$ 1.521.283.800,00	\$ 1.590.564.990,00	\$ 1.663.310.239,50	\$ 1.739.692.751,48	\$ 4.078.234.389,05
Factor de Descuento $1/(1+i)^n$ i=RMA	\$ 1,0000000	\$ 0,8695652	\$ 0,7561437	\$ 0,6575162	\$ 0,5717532	\$ 0,4971767
FLUJO NETO DE CAJA DESCONTADO A RMA		\$ 1.322.855.478,26	\$ 1.202.695.644,61	\$ 1.093.653.482,04	\$ 994.674.976,99	\$ 2.027.603.259,33
FNC DESCONTADO A RMA ACUMULADO		\$ 1.322.855.478,26	\$ 2.525.551.122,87	\$ 3.619.204.604,91	\$ 4.613.879.581,91	\$ 6.641.482.841,23
TIO	15,00%	ok: VPN>0, TIR>TIO				
Valor Presente Neto	\$ 160.735.343,21					
Tasa Interna de Retorno TIR	15,89%					
Indice de Valor Actual Neto (IVAN)	0,12					

Tabla 7. Flujo de caja proyecto con recursos propios.

6.2. ESCENARIO B. FLUJO DE CAJA PROYECTO CON FINANCIACIÓN

CÁLCULOS CON FINANCIACIÓN - CRÉDITO						
Tabla Amortización Crédito						
	0	1	2	3	4	5
Recursos de Crédito	648.074.749,80					
Amortización del crédito		\$ 98.043.046,54	\$ 111.769.073,06	\$ 127.416.743,29	\$ 145.255.087,35	\$ 165.590.799,57
Saldo de la deuda		550.031.703,26	438.262.630,20	310.845.886,92	165.590.799,57	-
Intereses		\$90.730.464,97	\$77.004.438,46	\$61.356.768,23	\$43.518.424,17	\$23.182.711,94
Total Pago Deuda		\$ 188.773.511,51				
Flujo de Caja Financiado						
	0	1	2	3	4	5
(+) Ingresos		\$ 2.100.000.000,00	\$ 2.205.000.000,00	\$ 2.315.250.000,00	\$ 2.431.012.500,00	\$ 2.552.563.125,00
(-) Gastos de mantenimiento		\$ 570.000,00	\$ 598.500,00	\$ 628.425,00	\$ 659.846,25	\$ 692.838,56
(-) Depreciaciones y Amortizaciones		\$ 399.000.000,00	\$ 399.000.000,00	\$ 399.000.000,00	\$ 399.000.000,00	\$ 399.000.000,00
(=) U. A.I.I.	\$ -	\$ 1.700.430.000,00	\$ 1.805.401.500,00	\$ 1.915.621.575,00	\$ 2.031.352.653,75	\$ 2.152.870.286,44
(-) Intereses préstamos		\$ 90.730.464,97	\$ 77.004.438,46	\$ 61.356.768,23	\$ 43.518.424,17	\$ 23.182.711,94
(=) Utilidad Antes de Impuestos	\$ -	\$ 1.609.699.535,03	\$ 1.728.397.061,54	\$ 1.854.264.806,77	\$ 1.987.834.229,58	\$ 2.129.687.574,50
(-) Impuestos		\$ 547.297.841,91	\$ 587.655.000,92	\$ 630.450.034,30	\$ 675.863.638,06	\$ 724.093.775,33
(=) Utilidad después de Imp.	\$ -	\$ 1.062.401.693,12	\$ 1.140.742.060,62	\$ 1.223.814.772,47	\$ 1.311.970.591,52	\$ 1.405.593.799,17
(+) Depreciaciones y Amortizaciones		\$ 399.000.000,00	\$ 399.000.000,00	\$ 399.000.000,00	\$ 399.000.000,00	\$ 399.000.000,00
= FLUJO DE CAJA DE LA OPERACIÓN	0	\$ 1.461.401.693,12	\$ 1.539.742.060,62	\$ 1.622.814.772,47	\$ 1.710.970.591,52	\$ 1.804.593.799,17
(-) Inversiones						
Equipo Compensación SVC	\$ 3.990.000.000,00					
Materiales	\$ 1.808.947.498,02					
Mano de obra	\$ 450.000.000,00					
Equipo y herramienta	\$ 65.800.000,00					
Transporte de personal	\$ 10.000.000,00					
Costos indirectos	\$ 156.000.000,00					
Gastos de puesta en marcha	\$ -					
(+) Recursos de Crédito	\$ 648.074.749,80					
(-) Pago Capital Créditos		\$ 98.043.046,54	\$ 111.769.073,06	\$ 127.416.743,29	\$ 145.255.087,35	\$ 165.590.799,57
Valor de salvamento						\$ 2.258.340.000,00
FLUJO NETO DE CAJA	\$ (5.832.672.748,22)	\$ 1.363.358.646,58	\$ 1.427.972.987,56	\$ 1.495.398.029,18	\$ 1.565.715.504,18	\$ 3.897.342.999,59
Factor de Descuento $1/(1+i)^n$ $i=RMA$	1,0000000	0,8695652	0,7561437	0,6575162	0,5717532	0,4971767
FLUJO NETO DE CAJA DESCONTADO A RMA		\$ 1.185.529.257,89	\$ 1.079.752.731,62	\$ 983.248.478,14	\$ 895.202.921,19	\$ 1.937.668.268,88
FNC DESCONTADO A RMA ACUMULADO		\$ 1.185.529.257,89	\$ 2.265.281.989,51	\$ 3.248.530.467,64	\$ 4.143.733.388,83	\$ 6.081.401.657,71
TIO	15,00%					
Valor Presente Neto	\$ 248.728.909,49	ok: VPN>0, TIR>TIO				
Tasa Interna de Retorno TIR	16,51%					
Indice de Valor Actual Neto (IVAN)	0,21					

Tabla 8. Flujo de caja proyecto con financiación.

7. ANALISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad, consiste en analizar el comportamiento del proyecto al variar algunos parámetros de las bases de análisis económico y financiero original, esto es, si cambian el resultado final del proyecto, es rentable o no lo es. (4)

7.1. ESCENARIO A. PROYECTO CON RECURSOS PROPIOS

7.1.1. SENSIBILIDAD EN LA INVERSION

Estos parámetros de análisis de sensibilidad, como es lógico son especiales dependiendo del tipo de proyecto que se analice. Para el proyecto de la compensación SVC en la planta de aceros DIACO se analizó la sensibilidad en la inversión de dicho proyecto, obteniendo los diferentes casos que se muestran a continuación:

ITEM	CASO	PROYECTO (sin prestamo)				PROYECTO (con prestamo)				VALOR
		TIR	VPN	IVAN	SWITCHING VALUE	TIR	VPN	IVAN	SWITCHING VALUE	
INVERSIÓN	(-) 20%	24,60%	1456,800	1,1	2,48%	26,08%	1531,70	1,26	3,86%	-0,2
	(-) 15%	22,13%	1132,800	0,86		23,30%	1207,60	1		-0,15
	(-) 10%	19,87%	808,800	0,61		20,78%	883,60	0,74		-0,1
	BASICO	15,89%	160,735	0,12		16,51%	248,728	0,21		0
	(+) 5%	14,13%	-163,302	-0,12		14,59%	-70,90	-0,06		0,05
	(+) 10%	12,49%	-487,330	-0,37		12,72%	-412,54	-0,33		0,1

Tabla 9. Sensibilidad de la inversión.

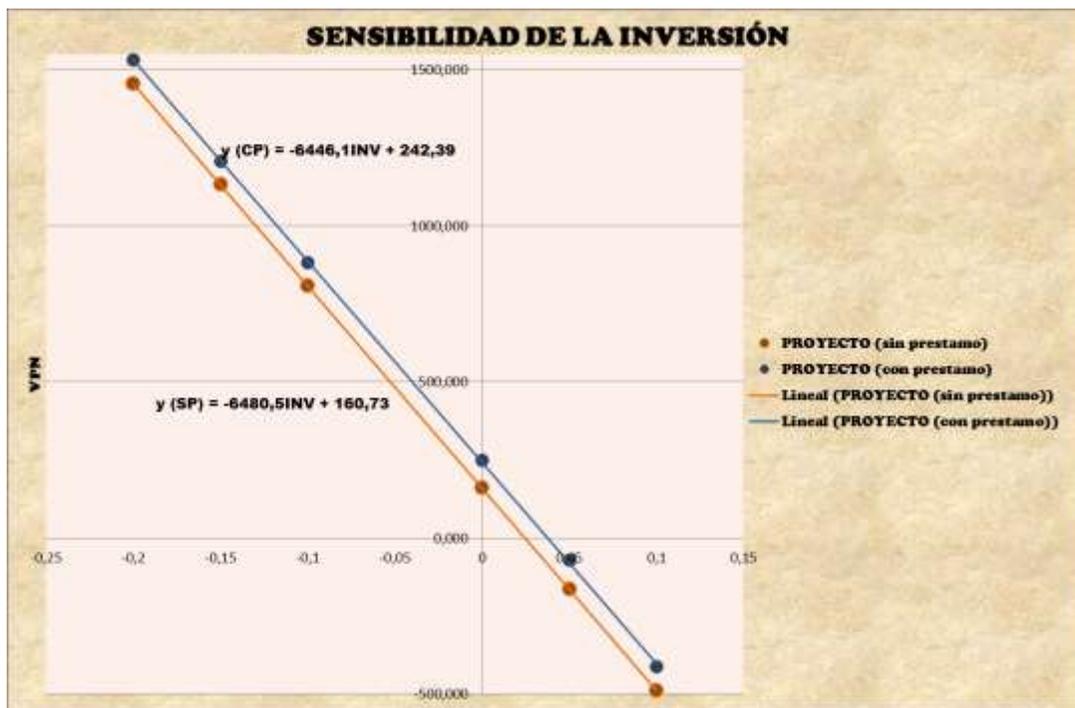


Ilustración 26. Gráfica de sensibilidad de la inversión.

7.1.2. SENSIBILIDAD DE LOS INGRESOS

ITEM	CASO	PROYECTO (sin prestamo)				PROYECTO (con prestamo)				VALOR
		TIR	VPN	IVAN	SWITCHING VALUE	TIR	VPN	IVAN	SWITCHING VALUE	
INGRESOS	(-) 10%	13,06%	-345,795	-0,29	3%	13,42%	-257,802	-0,24	5%	-0,1
	(-) 5%	14,48%	-92,530	-0,07		14,97%	-4,536	0		-0,05
	(-) 3%	15,05%	8,776	0,01		15,59%	96,769	0,08		-0,03
	BASICO	15,89%	160,735	0,12		16,51%	248,728	0,21		0
	(+) 10%	18,67%	667,266	0,46		19,55%	755,259	0,58		0,1
	(+) 15%	20,04%	920,531	0,61		21,04%	1008,525	0,74		0,15
	(+) 20%	21,41%	1173,797	0,75		22,53%	1261,79	0,88		0,2

Tabla 10. Sensibilidad de los ingresos.

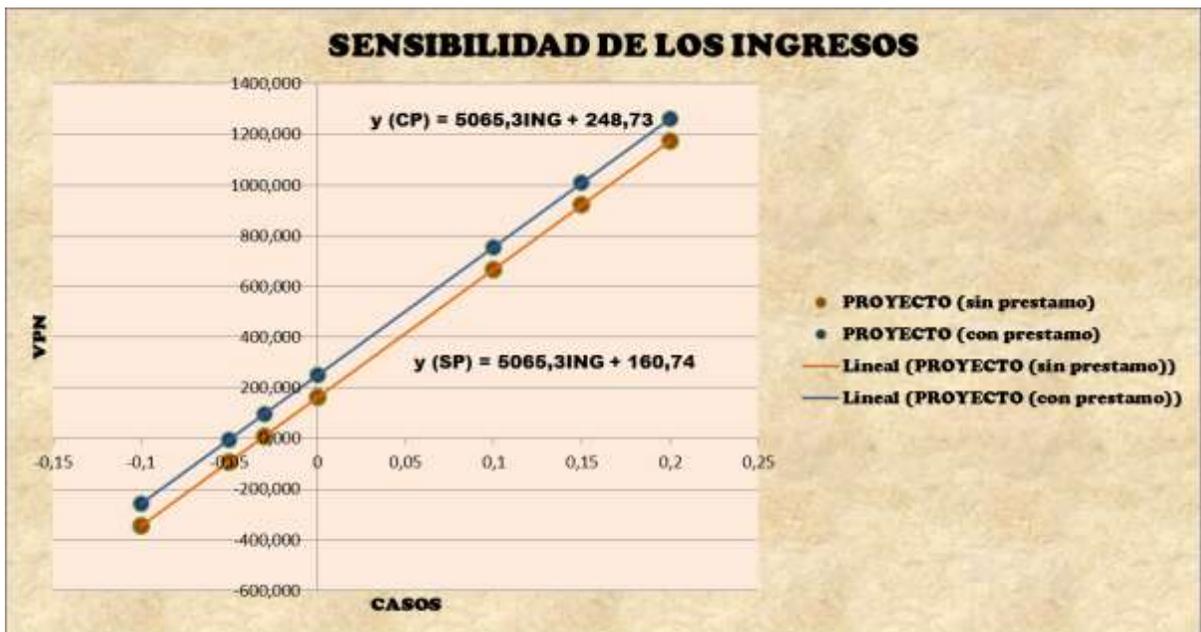


Ilustración 27. Gráfica sensibilidad de los ingresos.

CONCLUSIONES

- Al observar los valores de switching value arrojados en el análisis de las sensibilidades, se concluye que el proyecto es muy sensible a mínimas variaciones tanto en la inversión como en los ingresos. Por lo anterior, es fundamental que la empresa DIACO cumpla a cabalidad la planeación planteada para el caso base con el fin de obtener el rendimiento esperado para el proyecto.
- Se recomienda a la empresa consultora DIACO realizar el proyecto mediante un financiamiento bancario dado que, el análisis financiero arroja valores para la TIR y del valor presente neto mayores comparados con el caso de financiamiento mediante recursos propios. Además porque aunque también presenta una enorme sensibilidad a las variaciones, tiene un mayor rango en caso de cualquier eventualidad.
- Los valores obtenidos en cada uno de los parámetros financieros para la evaluación de la viabilidad del proyecto, fueron los esperados, es decir, muestran favorabilidad para la consecución del mismo.
- El proyecto arroja un VPN positivo de \$ 248.728.909,49 para el caso con el escenario de financiamiento bancario y de \$ 160.735.343,21 para el caso con el escenario de financiamiento mediante recursos propios, por lo que la inversión resulta atractiva dado que además de recuperar la inversión y generar una rentabilidad se obtendrá un excedente para cualquiera de los dos escenarios analizados.
- Aunque el proyecto evidencia valores elevados en cuanto a la sensibilidad es aconsejable correr el riesgo de realizarlo; dado que la ejecución del proyecto no es para un fin de incremento de capital que desarrolle la empresa de acuerdo a su razón social, sino que tiene el propósito de disminuir e incluso erradicar en su totalidad las penalizaciones en las que en este momento se está viendo afectada considerablemente la compañía, es muy recomendable llevar a cabo dicho proyecto de compensación de reactivos (SVC). Aunado se obtendrán beneficios paralelos como los son: mejorar la calidad del flujo eléctrico en el sistema y disminuir las caídas de tensión, lo que incrementará la confiabilidad y continuidad del servicio y, lo más significativo es que a futuro se verá reflejado en un ahorro financiero donde se podrá utilizar dicho presupuesto en inversión.

BIBLIOGRAFIA

1. **RODRIGUEZ HERNANDEZ, ALBERTO.** *GESTION DEL FLUJO DE POTENCIA REACTIVA-CREG CIRCULAR 087.* 2010.
2. **CARILLO GONZÁLES, CAMILO JOSE y CIDRAS PIDRE, JOSÉ.** *COMPENSADORES ESTÁTICOS DE POTENCIA.* 2003.
3. **RESOLUCIÓN, CREG 097.** *PRINCIPIOS GENERALES Y METODOLOGIA ESTABLECIMIENTO DE CARGOS POR USO PARA LOS STR Y SDL.* 2008.
4. **RESOLUCIÓN, CREG-025.** *ESTABLECIMIENTO DEL CODIGO DE REDES COMO PARTE DEL REGLAMENTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL.* 1995.
5. **RESOLUCIÓN, CREG-070.** *REGLAMENTO DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA COMO PARTE DEL REGLAMENTO DE OPERACIÓN DEL SIN.* 1998.
6. **RESOLUCIÓN, CREG-108.** *CRITERIOS GENERALES SOBRE LA PROTECCION DE LOS DERECHOS DE LOS USUARIOS DE LOS SERVICIOS PUBLICOS DOMICILIARIOS DE ENERGI ELECTRICA Y GAS.* 1997.
7. **RAFAEL ALFONSO ORTIZ SEPÚLVEDA, DARIO THORRENS GÓMEZ, RODOLFO HERNANDO VILLAMIZAR DUARTE.** • *ESTUDIO PREVIO DE VIABILIDAD DE INSTALAR UN NUEVO SISTEMA DE COGENERACIÓN, COMO UNA MEDIDA DE AHORRO DE ENERGÍA EN FERTICOL S.A. .* 2003.
8. **BUSTAMANTE ALZATE, GUILLERMO L.** *PAUTAS PARA LA INICIACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS DE INVERSION EN BIENES DE CAPITAL CAPÍTULO 10. INTRODUCCIÓN A LA EVALUACIÓN FINANCIERA.* 2011.
9. **RESOLUCIÓN, CREG-082.** *PRINCIPIOS GENERALES Y LA METODOLOGÍA PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LOS CARGOS POR USO DEL STR Y SDL.* 2002.