

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



MODELAMIENTO DE LA COMPENSACIÓN REACTIVA PARA UNA LINEA DE TRANSMISION DE 500 KV

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELÉCTRICISTA

PRESENTADO POR:

SILVIO VICENTE MAMANI SILLO

**PROMOCIÓN
2006- II**

**LIMA – PERU
2013**

**MODELAMIENTO DE LA COMPENSACIÓN REACTIVA
PARA UNA LINEA DE TRANSMISIÓN DE 500 KV**

Agradezco en primer lugar a mis padres Vicente y Rita, por su apoyo, dedicación, cuidados y su amor, por creer en mí siempre.

A mis hermanos Carlos y Lupe por acompañarme en este largo camino.

A mi querida Universidad, mi alma mater.

SUMARIO

En el presente informe de suficiencia se describe un modelo matemático adecuado para el análisis de la compensación reactiva de una línea de transmisión. Se conoce que un sistema de potencia debe transmitir la potencia activa desde los generadores hasta las cargas pasando por un sistema de transmisión manteniendo el nivel de tensión dentro de los límites aceptables. En este informe se analizó que es posible mejorar el nivel de tensión y mejorar las características de transmisión del sistema mediante el empleo de condensadores, reactancias u otros equipos que generan o consuman potencia reactiva.

El presente informe se compone de cuatro capítulos. En el capítulo I, se realiza una breve introducción al tema de líneas de transmisión de 500 kV, se define el objetivo, el alcance y justificación del informe. En el capítulo II, se desarrolla el modelo de línea de transmisión para el análisis de la compensación reactiva, los tipos de compensación y sus efectos sobre la tensión de la línea y su capacidad de transmisión. En el capítulo III, se desarrolla el planteamiento del problema, definiendo los criterios, metodología y la descripción del circuito a analizar.

Finalmente en el capítulo IV, se desarrolló la aplicación de la teoría descrita en el presente informe, para el proyecto de “Línea de Transmisión de 500 kV S.E. Carabayllo – S.E. Chimbote Nueva – S.E. Trujillo Nueva y subestaciones asociadas”. Del proyecto mencionado se analiza la compensación reactiva para la línea L-5006 (S.E. Carabayllo – S.E. Chimbote Nueva), para ello se realizan simulaciones de flujo de potencia empleando el programa DIgSILENT Power Factory.

INDICE

PROLOGO	1
CAPITULO I	
INTRODUCCION	
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objetivo Principal	3
1.3 Objetivos Específicos	3
1.4 Alcance	3
1.5 Importancia o Justificación del Informe	3
CAPITULO II	
FUNDAMENTO TEORICO	
2.1 Líneas de Transmisión	4
2.1.1 Parámetros de líneas de transmisión de 500 kV	4
2.1.2 Modelo de línea de transmisión en estado estacionario	5
2.1.3 Ecuaciones Básicas de una Línea de Transmisión	5
2.1.4 Línea de Transmisión sin pérdidas	6
2.1.5 Impedancia Característica y potencia natural	6
2.2 Líneas sin pérdidas en diversas circunstancias	8
2.2.1 La línea sin pérdidas en circuito abierto (energización en vacío)	8
2.2.2 La línea simétrica sin pérdidas (recién sincronizada y en vacío)	9
2.2.3 Límites de transferencia de potencia	10
2.2.4 Línea no compensada, sin pérdidas y bajo carga	11
2.2.5 Compensación reactiva en sistemas de transmisión	12
2.2.6 Efecto de la compensación sobre la tensión de la línea y la potencia máxima	15
2.2.7 Compensadores	15
CAPITULO III	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
3.1 Descripción del Problema	18
3.1.1 Área de influencia	18

3.1.2	Línea de Transmisión L – 5006	18
3.1.3	Subestación Carabaylo 500 kV	19
3.1.4	Subestación Chimbote Nueva 500 kV	19
3.1.5	Configuración eléctrica de la Línea de Transmisión L-5006	21
3.2	Criterios	22
3.3	Metodología	22
3.3.1	Compensación Reactores de Línea	22
3.3.2	Compensación Reactores de Barra	22
3.3.3	Compensación Serie	23
3.4	Información Utilizada	23
3.4.1	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional	23
CAPITULO IV		
APLICACIÓN DE UN CASO PRÁCTICO Y RESULTADOS		
4.1	Línea de Transmisión L – 5006 energizada en vacío sin compensación	25
4.2	Esquema del Sistema Eléctrico a Analizar	26
4.3	Análisis de las simulaciones realizadas	27
4.3.1	Compensación reactiva variable en S.E. Chimbote Nueva sin compensación de barra en S.E. Chimbote Nueva	27
4.3.2	Compensación reactiva variable en S.E. Carabaylo sin compensación de barra en S.E. Chimbote Nueva	29
4.3.3	Compensación reactiva variable de Barra en S.E. Chimbote Nueva	31
4.3.4	Compensación reactiva variable en S.E. Chimbote Nueva con compensación de la barra de Chimbote	33
4.3.5	Compensación reactiva variable en S.E. Carabaylo con compensación de barra en S.E. Chimbote Nueva	36
4.4	Resultados	38
4.5	Efectos de la Compensación Shunt sobre la Impedancia Característica, Constante de Fase y Potencia Natural	39
4.6	Característica Potencia – Angulo de la línea L-5006 con compensación	40
4.7	Máxima Potencia de Transferencia	42
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		
ANEXOS		
BIBLIOGRAFIA		
		44
		45
		62

PROLOGO

El propósito de este informe es revisar y evaluar la necesidad de la compensación reactiva para la operación eficiente y confiable de un sistema de eléctrico de potencia, especialmente en sistemas de transmisión de muy alta tensión. Normalmente, la compensación es proporcionada por condensadores, compensando la naturaleza inductiva del sistema de transmisión y de las cargas. No obstante, de acuerdo a las características del sistema eléctrico de potencia, en determinadas circunstancias es necesaria la compensación mediante reactancias inductivas que absorban potencia reactiva capacitiva de la línea, es decir es necesaria una compensación reactiva inductiva. Por ejemplo al momento de la energización en vacío, ocurre un sobrevoltaje temporal en el extremo receptor abierto de la línea de Transmisión cuyo voltaje es superior al voltaje presente en el extremo emisor (efecto Ferranti).

Se desarrolla una aplicación práctica considerando el caso de la línea de Transmisión L-5006 que conecta la S.E. Carabayllo 500kV con la S.E. Chimbote 500kV. Todos los análisis eléctricos se realizan empleando el programa de simulación DIgSILENT Power Factory y el archivo fuente DIgSILENT del SEIN, que se obtiene de la dirección web del COES (<http://www.coes.org.pe>). Los datos para el modelo de la línea de transmisión L-5006 se obtuvieron de la ficha del proyecto entregada al COES.

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

De acuerdo al crecimiento económico del país en los últimos años, la demanda de la energía eléctrica en el Perú tiene un crecimiento progresivo, razón por la cual para evitar la deficiencia de generación y el congestionamiento de las líneas de transmisión, el Ministerio de Energía y Minas desarrolla un plan de expansión del Sistema de Generación y Transmisión del 2011-2020. En el primer plan de transmisión se incluyó el reforzamiento de las líneas de transmisión de 220 kV existentes y el ingreso a partir del 2011 de líneas de transmisión de 500 kV.

El ingreso de sistemas de transmisión de 500 kV representa un importante reforzamiento en el sistema de transmisión existente, la misma que mejorará las condiciones de operación, así como ante contingencias del sistema eléctrico, obteniéndose una mejora importante en la calidad y confiabilidad del SEIN. Los Sistemas de Transmisión de 500kV permitirán transportar mayores cantidades de energía eléctrica (700, 800, 1200 MVA), a través de grandes distancias, permitiendo el descongestionamiento y aumento de la capacidad de transmisión del SEIN.

De acuerdo a la norma NTP-IEC 60038: “Tensiones Normalizadas IEC”, se tiene en el Perú los siguientes niveles de tensión vigentes:

Baja Tensión: 380/220 V 440/220 V

Media tensión: 20,0 kV 22,9 kV 22,9/13,2 kV 33 kV 33/19 kV

Alta Tensión: 60 kV 138 kV 220 kV

Muy Alta Tensión: 500 kV

Para el funcionamiento de las líneas de transmisión de 500 kV se han construido nuevas subestaciones, por ejemplo S.E. Chilca, S.E. Carabayllo, S.E. Chimbote Nueva, S.E. Trujillo Nueva, etc. En estas subestaciones elevadoras, dicha transformación se efectúa empleando transformadores o autotransformadores. Las subestaciones de Muy Alta Tensión son diseñadas con una mayor confiabilidad de forma que se opere en forma segura

en condiciones normales y adversas; la configuración de barras más utilizada es el denominado interruptor y medio, por ejemplo S.E. Carabayllo 500 kV.

1.2 Objetivo general

El objetivo del presente informe es realizar el modelamiento de los sistemas de compensación reactiva para una línea de transmisión de 500 kV.

1.3 Objetivos específicos

Describir las características principales de una línea de Transmisión en muy alta tensión y un modelo adecuado para el análisis de la compensación reactiva.

Describir los diferentes tipos de compensación reactiva para una línea de transmisión.

Simular e interpretar los resultados obtenidos con el apoyo del software DIGSILENT, en la aplicación práctica de la Subestación Carabayllo 500 kV.

1.4 Alcance

En el presente informe se verificará la compensación reactiva necesaria para la línea de transmisión L-5006 (S.E. Carabayllo – S.E. Chimbote Nueva) del proyecto “Línea de Transmisión de 500kV S.E. Carabayllo – S.E. Chimbote Nueva – S.E. Trujillo Nueva y subestaciones asociadas”.

El modelo desarrollado para el análisis de la compensación reactiva será desde un punto de vista estacionario, es decir, no se tendrán en cuenta los posibles problemas de estabilidad transitoria que se puedan presentar.

1.5 Importancia o Justificación del Informe

La transmisión de potencia en un sistema eléctrico es un proceso dinámico que varía constantemente dependiendo de la curva de demanda del país. Ante el ingreso de nuevas líneas de transmisión de 500kV, se produce también un desbalance en el equilibrio de la energía reactiva de los nodos.

La compensación reactiva consiste en la inyección o absorción de energía reactiva para mejorar las características de transmisión del sistema, y de forma más específica para mantener la tensión dentro de los límites deseados, aumentar la capacidad de transporte y contribuir al mantenimiento de la estabilidad del SEIN.

CAPITULO II

FUNDAMENTO TEORICO

2.1 Líneas de Transmisión

2.1.1 Parámetros de líneas de transmisión de 500 kV

Las líneas de transmisión tienen un comportamiento distinto según su geometría, los materiales utilizados para los conductores y su aislante. El material para los conductores de fase empleado comúnmente en líneas de transmisión es el aluminio (AAAC, ACAR) y el aluminio-acero (ACSR), el primero debido a su baja resistencia eléctrica y el segundo por su alta resistencia mecánica. Para el cable de guarda se emplean cuerdas de acero galvanizado, el que puede incluir un tubo central de aluminio con fibras ópticas en su interior. Estas propiedades determinan los valores de los parámetros de las líneas, los cuales son: Resistencia, Inductancia, Conductancia y Capacitancia.

En el diseño de líneas de 500 kV se utiliza múltiples conductores por fase (2, 4, 8, 12 / fase), y para mantener la distancia entre los conductores se instalan espaciadores a intervalos separados en cada vano de la línea. Adicionalmente también se tiene un incremento en la faja de servidumbre.

En la Tabla N° 2.1 se muestran los parámetros de línea y características principales de las líneas de Paramonga - Chimbote 220 kV y Chilca - Carabayllo 500 kV.

TABLA N° 2.1 Parámetros de líneas de transmisión en 220 kV y 500 kV

Parametro / característica	Paramonga - Chimbote 220 kV	Chilca - Carabayllo 500 kV
resistencia (Ω/km)	0.0899	0.0316
reactancia (Ω/km)	0.4800	0.3170
Susceptancia (S/km)	3.39255	5.26585
Longitud	221	90
Faja de servidumbre	25	64
β (rad/km)	0.00128	0.00129
Z_c (Ω)	376	245
Po (MW)	128	1020
Potencia reactiva (MVA _r /km)	0.16	1.3

2.1.2 Modelo de línea de transmisión en estado estacionario

El modelo adecuado de una línea de transmisión en estado estacionario es un cuadripolo, ya que solo nos interesa conocer los valores de tensión y corriente en ambos extremos de la línea. Entonces se establece la definición de constantes ABCD y su relación con la matriz de admitancia nodal tal como se muestra en la Fig. 2.1.

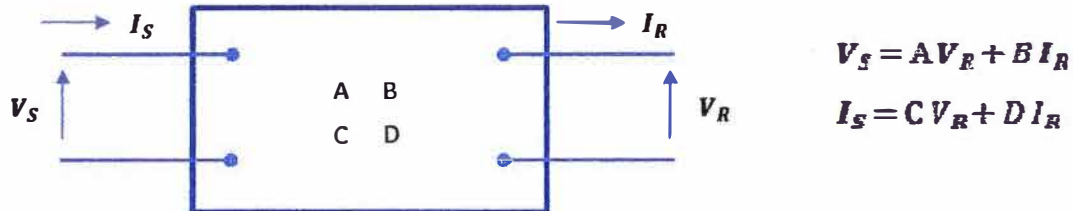


Fig. 2.1 Modelo de cuadripolos de una L.T.

Donde:

V_S, I_S : tensión y corriente de envío.

V_R, I_R : tensión y corriente de recepción.

Las constantes A, B, C, D en general son números complejos que dependen de las constantes R, L, G y D.

En función de la longitud (L) de la línea y con $f = 60$ Hz, se puede considerar los siguientes tipos de línea: corta ($L < 80$ km), media ($L < 250$ km), y larga ($L \geq 250$ km).

2.1.3 Ecuaciones Básicas de una Línea de Transmisión

La solución exacta de cualquier línea de transmisión y la única que proporciona una gran precisión en el cálculo de líneas de gran longitud ($L \geq 250$ km), exige considerar que los parámetros de la línea no están concentrados, sino distribuidos uniformemente a todo lo largo de la línea.

Considerando una línea trifásica en estado senoidal estacionario, y además en régimen equilibrado, esta se puede representar por su esquema monofásico equivalente tal como se muestra en la Fig. 2.2.

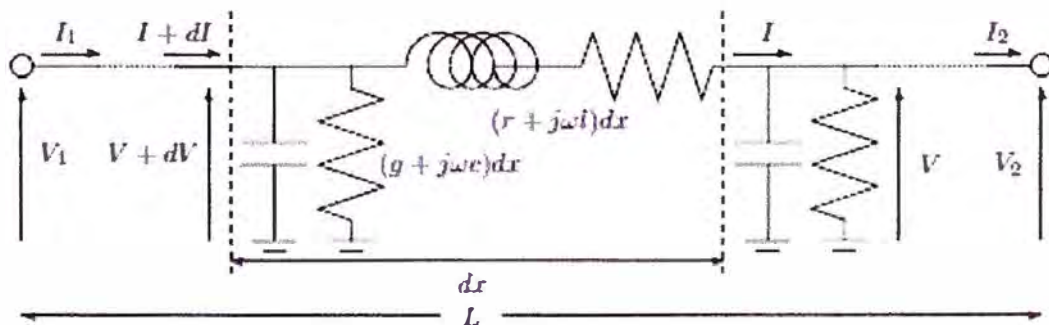


Fig. 2.2 Representación de una línea larga con parámetros distribuidos

La solución de las ecuaciones básicas de una línea de transmisión (V y I) a lo largo de la distancia x desde el extremo de recepción de la línea de transmisión son:

$$\begin{aligned} V_{(x)} &= V_2 \cosh \gamma x + jZ_c I_2 \sinh \gamma x \\ I_{(x)} &= I_2 \cosh \gamma x + j \frac{V_2}{Z_c} \sinh \gamma x \end{aligned} \quad (2.1)$$

Donde:

V_2, I_2 : tensión y corriente en el extremo de recepción de la línea de transmisión

Se ha definido Z_c , el parámetro conocido como **Impedancia Característica** de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$Z_c = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} \quad (2.2)$$

Donde:

$r + j\omega l$: Impedancia serie por kilómetro

$g + j\omega c$: Admitancia shunt por kilómetro

2.1.4 Línea de Transmisión sin pérdidas

En las líneas de transmisión típicas, g es prácticamente cero y la parte resistiva r es pequeña en comparación con la parte inductiva ωl . Por tanto, una aproximación posible es considerar el caso de una línea sin pérdidas con $r = 0$, tal como se muestra en la Fig. 2.3.

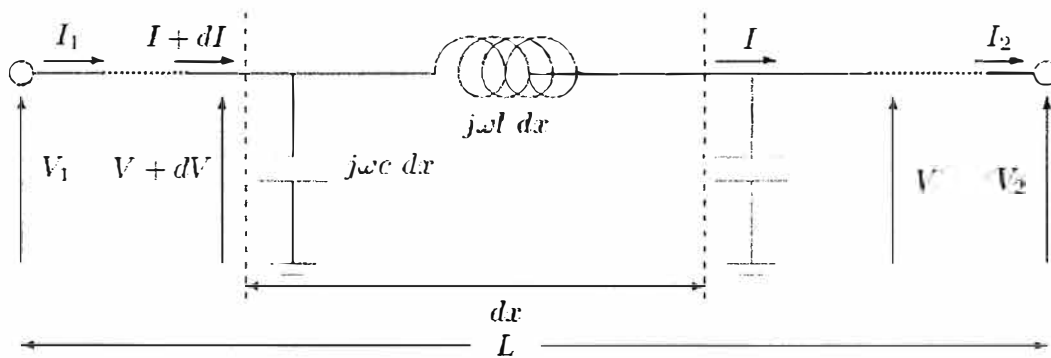


Fig. 2.3 Representación de una línea de transmisión sin pérdidas

Reemplazando y simplificando en (1), se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} V_{(x)} &= V_2 \cos \beta x + jZ_c I_2 \sin \beta x \\ I_{(x)} &= I_2 \cos \beta x + j \frac{V_2}{Z_c} \sin \beta x \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.1.5 Impedancia Característica y Potencia Natural

La impedancia característica Z_c (Surge impedance) para una línea sin pérdidas es:

$$Z_c = \sqrt{\frac{j\omega l}{j\omega c}} = \sqrt{\frac{l}{c}} \quad (2.4)$$

En el extremo de envío de la línea de transmisión se tiene $x = L$, y recordando que $\theta = \beta L$.

Donde β es conocida como la constante de fase y θ como ángulo de la línea.

$$\begin{aligned} V_1 &= V_2 \cos \theta + jZ_C I_2 \sin \theta \\ I_1 &= I_2 \cos \theta + j \frac{V_2}{Z_C} \sin \theta \end{aligned} \quad (2.5)$$

Para entender el significado de la impedancia característica, considérese que se cierra el extremo 2 de la línea a través de una resistencia de valor Z_C . Esto implica que:

$$V_2 = Z_C I_2 \quad (2.6)$$

Luego:

$$V(x) = V_2 (\cos(\beta x) + j \operatorname{sen}(\beta x)) = V_2 e^{j\beta x} \quad (2.7)$$

$$I(x) = I_2 (\cos(\beta x) + j \operatorname{sen}(\beta x)) = I_2 e^{j\beta x} \quad (2.8)$$

Entonces la impedancia aparente desde cualquier punto es:

$$Z_{(x)} = \frac{V_{(x)}}{I_{(x)}} = \frac{V_2}{I_2} = Z_C \quad (2.9)$$

En la expresión (2.9) no aparece la longitud de la línea, es decir, que una línea que transmite potencia en su extremo final a una carga puramente resistiva de valor igual a su impedancia característica Z_C presenta las mismas características de entrada independientemente de su longitud.

Más importante es que el módulo de la tensión $V(x)$ y la intensidad $I(x)$, permanecen constantes, así como el desfase entre ambas. El ángulo de fase entre las tensiones (corrientes) de envío y de recepción es igual a βl .

La potencia aparente en cada punto de la línea es constante; ya que no se tienen pérdidas:

$$S_{(x)} = V_{(x)} \cdot I_{(x)}^* = \frac{\|V_2\|^2}{Z_C} \quad (2.10)$$

Como Z_C es un número real, no se transmite potencia reactiva ($Q(x) = 0$), sino solamente activa. Si además la tensión de la línea es su tensión nominal V_0 , la potencia que transmite en las condiciones anteriores es la llamada potencia natural de la línea P_0 .

$$P_0 = \frac{V_0^2}{Z_C} \quad (2.11)$$

Es decir que una línea transmitiendo su potencia natural, sin transmitir potencia reactiva, mantiene un perfil plano de tensiones en toda su longitud. Esta es una condición interesante, porque significa que el aislamiento de la línea tiene una sollicitación constante.

La potencia reactiva transmitida se mantiene igual a cero, debido a que la potencia reactiva generada por las capacitancias shunt $V^2 \omega c$ es absorbida de forma exacta por las inductancias series $I^2 \omega l$. Si ambas son iguales, se verifica:

$$V^2 \omega c = I^2 \omega l \quad (2.12)$$

Es decir,

$$\frac{V}{I} = \sqrt{\frac{l}{c}} = Z_c \quad (2.13)$$

2.2 Líneas sin pérdidas en diversas circunstancias

2.2.1 La línea sin pérdidas en circuito abierto (energización en vacío)

En esta circunstancia, es claro que $I_2 = 0$. Por tanto, de (2.3), se sigue que:

$$\begin{aligned} V(x) &= V_2 \cos \beta x \\ I(x) &= j \frac{V_2}{Z_c} \sin \beta x \end{aligned} \quad (2.14)$$

Considerando $V_1 = E_S$, (donde E_S es una tensión constante), entonces de (2.14) y recordando que $\theta = \beta L$:

$$\begin{aligned} V(x) &= \frac{E_S}{\cos(\theta)} \cos(\beta x) \\ I(x) &= j \frac{E_S}{Z_c \cos(\theta)} \sin(\beta x) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Si $\theta = \pi/2$, entonces $V_2 = \infty$. Es decir, una línea de aproximadamente 1.200 kilómetros tendría tensiones extremadamente altas en el extremo de recepción en circuito abierto. En principio estas líneas, no son operables sin la presencia de compensación.

Para las líneas habituales, con $\theta < \pi/2$, es claro que $V_2 > E_S$, y que la tensión crece de forma continua desde el punto de envío hasta la carga. La Fig. 2.4 muestra el perfil de tensión y el de corriente para una línea en 500 kV de 300 km, que le corresponde a una distancia eléctrica $\theta \approx 22.3^\circ$. Se nota que la tensión en el extremo abierto de la línea es un 8.1 % superior a la del extremo inicial. Este incremento es el llamado efecto Ferranti.

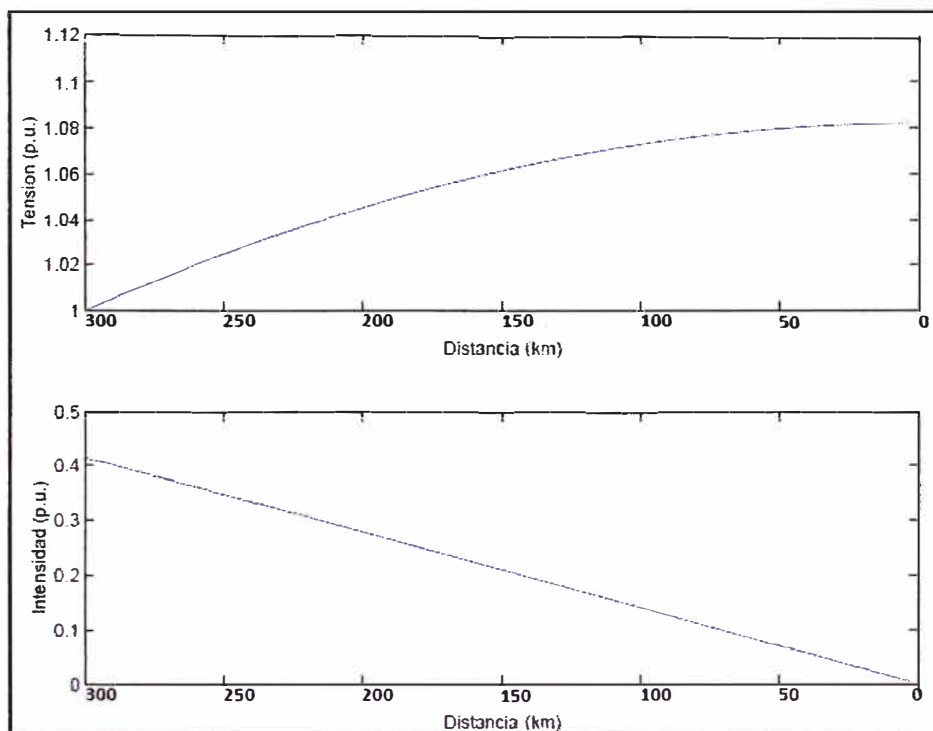


Fig. 2.4 Tensión y corriente en función de la distancia a la barra de recepción

En la práctica, después de una apertura repentina de la línea en el extremo receptor, la tensión de extremo de envío se elevará debido a la corriente capacitiva de la línea que fluye a través de la impedancia de la fuente. La compensación de potencia reactiva deberá ser necesaria en líneas largas para mantener el aumento de la tensión a niveles aceptables.

2.2.2 La línea simétrica sin pérdidas (recién sincronizada y en vacío)

Para simplicidad, se asume que la línea es simétrica, es decir está conectada a fuentes idénticas en los dos extremos. Siendo E_S y E_R , la tensión del extremo de envío y recepción respectivamente. De (2.3) tenemos que:

$$\begin{aligned} E_S &= E_R \cos \theta + jZ_C I_R \sin \theta \\ I_S &= I_R \cos \theta + j \frac{V_R}{Z_C} \sin \theta \end{aligned} \quad (2.16)$$

Considerando que ambas fuentes mantienen la misma tensión en módulo: $E_S = E_R$. Supóngase también que no hay transferencia de potencia activa, entonces las corrientes inyectadas deben tener el mismo módulo: $I_1 = I_2$, y cada corriente debe estar en cuadratura con cada tensión, con el fin de que no se genere potencia activa.

Se puede realizar la conjetura de que $I_1 = -I_2$, es decir, que ambas corrientes son iguales en módulo y fase (el signo - aparece porque una está entrando en la línea y la otra saliendo).

Calculando la tensión y corriente de las expresiones en (2.16) se obtiene:

$$\begin{aligned} I_{(x)} &= j \frac{E_R}{Z_C} \left\{ \begin{array}{l} \text{sen}(\beta x) \quad \cos(\beta x) \tan \frac{\theta}{2} \\ \end{array} \right\} \\ V_{(x)} &= E_R \left\{ \begin{array}{l} \cos(\beta x) + \text{sen}(\beta x) \tan \frac{\theta}{2} \\ \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (2.17)$$

En la Fig. 2.5 se muestran los perfiles de tensión y corriente para una línea de 400 km con $E_S = E_R = 1.0$ p.u. Se observa que en el punto medio ($l = 200$ km) se tiene el máximo valor de tensión (1.0345 p.u.) y la intensidad cambia de signo entre un extremo y otro de la línea, por lo tanto en el punto medio es cero. Es decir, media línea es equivalente a la línea en circuito abierto. Por lo tanto, la tensión a mitad de la línea debe ser:

$$V_m = \frac{E_R}{\cos(\theta/2)} \quad (2.18)$$

Si E_S y E_R no son iguales, el perfil de corriente y tensión no son simétricos y el valor máximo de tensión no está en el punto medio de la línea, pero está cercano al voltaje más alto de la línea.

Los generadores en el extremo de envío y recepción de extremo deben ser capaces de absorber la potencia reactiva debido a la carga de la línea. Si esto excede la capacidad de potencia reactiva subexcitada de los generadores conectados, la compensación reactiva debe ser proporcionada.

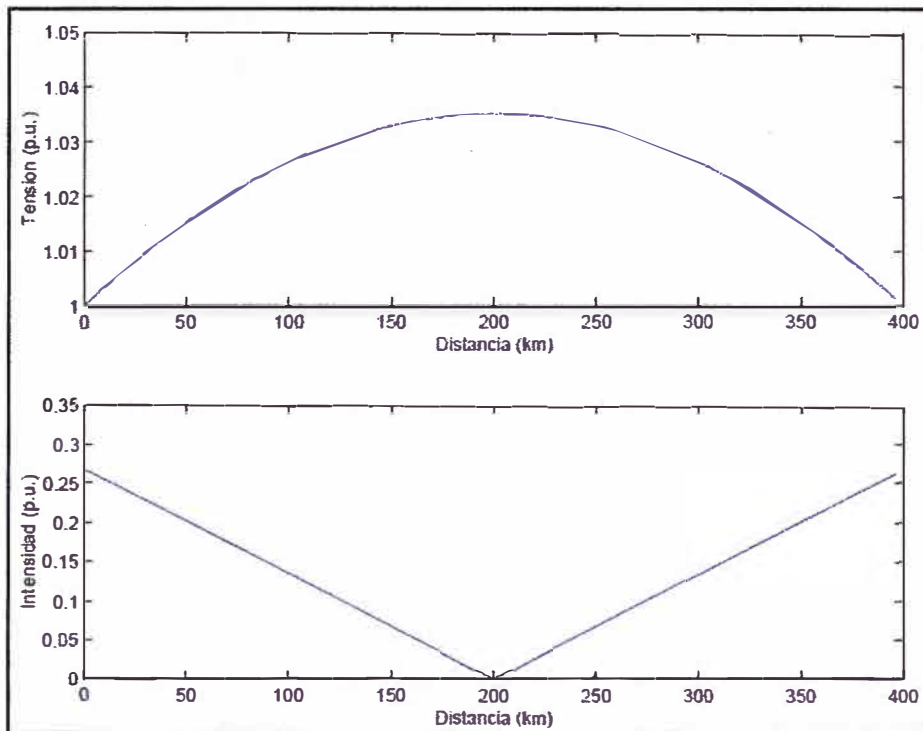


Fig. 2.5 Tensión y corriente en función de la distancia a la barra de recepción

2.2.3 Límites de transferencia de potencia

En general se puede establecer tres límites importantes que impiden que la transferencia de potencia desde los generadores a las cargas exceda de ciertos valores en régimen estacionario:

a) Límite térmico

Un aspecto es la temperatura máxima de trabajo para los conductores, antes que pierdan sus propiedades mecánicas. Se define tal como límite térmico, el cual está en función del número de conductores por fase, temperatura ambiente y los vientos sobre los conductores.

b) Caída de Tensión

En el Perú se maneja un límite de $\pm 5\%$, esto significa que si $V_S = 1$ pu, el valor de V_R será de 0.95 pu. En la caída de tensión interviene la reactancia equivalente de la línea (en función de los conductores por fase, y la compensación serie existente), y el soporte de reactivos en ambos extremos ante condiciones de máxima transferencia de potencia. Un problema de sobretensión puede presentarse en condiciones de baja demanda o para línea operando en vacío.

c) Límite por estabilidad

Un tercer criterio limitante se establece por la separación angular de los voltajes de envío V_R y el de recepción V_S . A este indicador se le conoce como límite de estabilidad en estado

estable. En la práctica se maneja un ángulo $\delta = 30^\circ$, ya que ante oscilaciones transitorias se tiene un margen que se considera suficiente, respecto a una separación máxima de 90° en estado estable.

2.2.4 Línea no compensada, sin pérdidas y bajo carga

Considérese ahora una línea operando con una tensión de envío fija V_S tal como se muestra en la Fig.2.6, entregando potencia activa y reactiva ($P+jQ$) en la barra de recepción.

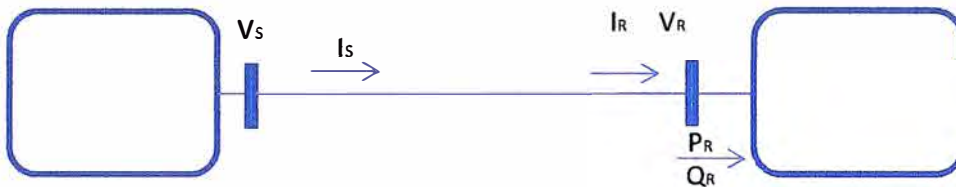


Fig. 2.6 Potencia Activa y Reactiva en la barra de recepción

Por lo tanto se tiene que la corriente de recepción I_R es:

$$I_R = \frac{P - jQ}{V_R} \quad (2.19)$$

Reemplazando (2.19) en (2.3)

$$V_S = V_R \cos\theta + jZ_C \text{sen}\theta \left\{ \frac{P - jQ}{V_R} \right\}$$

$$V_S = V_R \cos\theta + Z_C \text{sen}\theta \frac{Q}{V_R} + jZ_C \text{sen}\theta \frac{P}{V_R} \quad (2.20)$$

Considerando $V_R = V_R$ (ángulo 0°), entonces $V_S = V_S \cos\delta + jV_S \text{sen}\delta$

$$V_S \cos\delta + jV_S \text{sen}\delta = V_R \cos\theta + Z_C \text{sen}\theta \frac{Q}{V_R} + jZ_C \text{sen}\theta \frac{P}{V_R}$$

Donde δ es el ángulo de carga o ángulo de transmisión.

Resolviendo:

$$P = \frac{V_S V_R}{Z_C \text{sen}\theta} \text{sen}\delta \quad (2.21)$$

$$Q = \frac{V_S V_R}{Z_C \text{sen}\theta} \cos\delta - \frac{V_R^2 \cos\theta}{Z_C \text{sen}\theta} \quad (2.22)$$

Si se supone que $V_S = V_R = 1.0$ p.u. entonces se tendrá:

$$P = \frac{P_0}{\text{sen}\theta} \text{sen}\delta \quad (2.23)$$

$$Q = \frac{P_0}{\text{sen}\theta} (\cos\delta - \cos\theta) \quad (2.24)$$

De (2.23) y (2.24), se obtiene que la potencia activa y reactiva que se transmite a la carga depende de la potencia natural (P_0) y el ángulo de la línea.

En la Fig. 2.7 se grafica P y Q en función de δ en la barra de recepción para una línea de longitud $l = 300$ km. Se puede observar que para un ángulo $\delta < \theta$ ($\theta = 22.18^\circ$) Q es

positivo y $P > P_0$, por lo tanto debe suministrarse potencia reactiva para mantener la tensión deseada. Para $\delta > \theta$, Q es negativo y $P < P_0$, lo cual indica que el extremo de recepción recibe VARs de la línea.

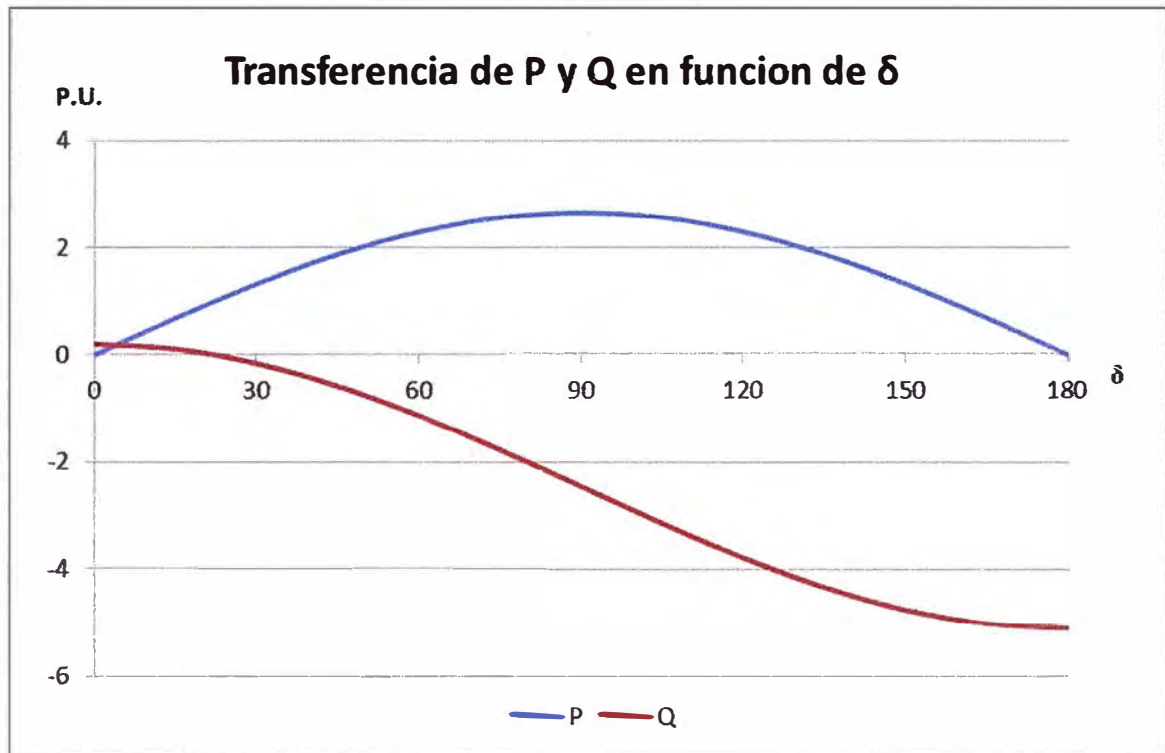


Fig. 2.7 P y Q en la barra de recepción en función de delta

2.2.5 Compensación reactiva en sistemas de transmisión

Como la potencia reactiva no puede ser transmitida en grandes distancias, el control de la tensión tiene que ser efectuado utilizando equipos especiales esparcidos a través del sistema de transmisión. Por lo tanto, la compensación reactiva consiste en la inyección o absorción de energía reactiva para mejorar la operación del sistema eléctrico de potencia.

En general, la compensación en la transmisión sirve para los siguientes propósitos:

- Tener un perfil de tensiones más plano, es decir lo más uniforme posible.
- Mejora la estabilidad al aumentar el límite de transferencia de potencia.
- Proporciona la energía reactiva requerida por el sistema de transmisión de una forma económica.

Existen dos esquemas básicos de compensación en líneas de transmisión:

1. Compensación serie
2. Compensación paralelo

Con la finalidad de obtener relaciones simples, que ayuden a comprender la naturaleza fundamental de cada tipo de compensación, se considera en la deducción de estas relaciones, los casos ideales de compensación uniformemente distribuida, lo cual permite

una aproximación directa al problema, y de los resultados se obtienen las conclusiones sobre lo adecuado del procedimiento.

a) Compensación serie en sistemas de transmisión

Considerando el siguiente circuito de la Fig. 2.8:

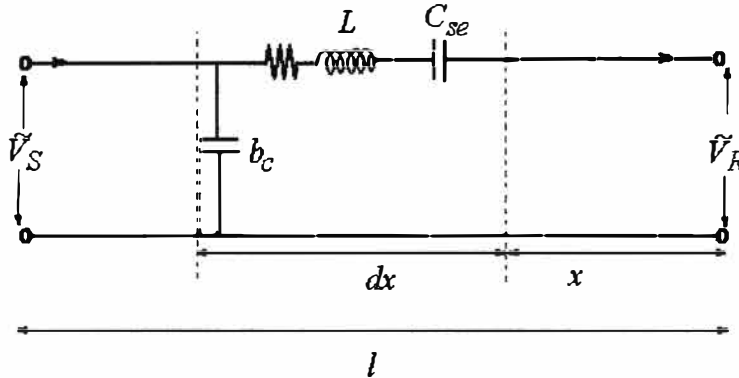


Fig. 2.8 Línea de transmisión con compensación capacitiva serie

Si la compensación serie capacitiva uniformemente distribuida es de C_{se} faradios por unidad de longitud, entonces la reactancia serie efectiva de la línea compensada es:

$$x_L' = x_L - \frac{1}{\omega C_{se}} = x_L - x_{C_{se}} = x_L (1 - k_{se}) \quad (2.25)$$

Donde k_{se} es el grado de compensación serie capacitiva, definido como:

$$k_{se} = \frac{x_{C_{se}}}{x_L} \quad (2.26)$$

Para representar la compensación serie capacitiva k_{se} debe ser positivo.

Los valores efectivos de la impedancia característica (Z_C) y constante de fase (β) de la línea con compensación capacitiva serie están dados por:

$$Z_C' = Z_C (\sqrt{1 - k_{se}}) \quad (2.27)$$

$$\beta' = \beta (\sqrt{1 - k_{se}}) \quad (2.28)$$

Por lo tanto la compensación serie capacitiva disminuye tanto a la impedancia característica como a la constante de fase de la línea.

Se puede decir que el efecto de la compensación serie en una línea de transmisión es: una compensación de la parte inductiva de la línea que conlleva una menor impedancia total, y por tanto una mayor capacidad de transmisión. También la compensación serie es utilizada en líneas largas de alta tensión con la finalidad de mejorar la estabilidad en estado transitorio o bien obtener una deseada división del transporte del flujo de potencia entre circuitos paralelos.

Los condensadores serie deben ser capaces de soportar toda la corriente que circula por la línea, incluso en caso de cortocircuito. En general, la instalación de estos sistemas

solamente se justifica en el caso de líneas de muy elevada impedancia, es decir, muy largas: es difícil ver estas instalaciones asociadas a líneas de menos de 500 km.

b) Compensación paralelo (shunt) en sistemas de transmisión

Considerando el siguiente circuito de la figura 2.9:

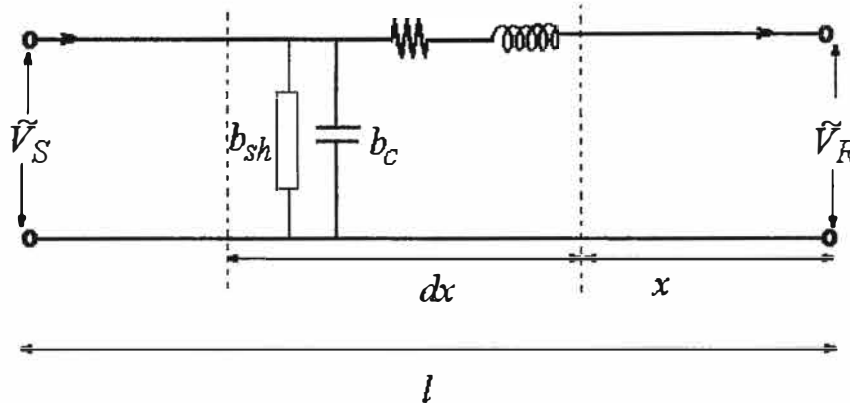


Fig. 2.9 Línea de transmisión con compensación shunt

La susceptancia “shunt” efectiva de la línea compensada es:

$$b_C' = b_C - b_{sh} = b_C (1 - k_{sh}) \quad (2.29)$$

Donde k_{sh} es el grado de compensación shunt, definido como:

$$k_{sh} = \frac{b_{sh}}{b_C} \quad (2.30)$$

Para representar la compensación “shunt” inductiva, b_{sh} debe ser positivo y negativo para la “shunt” capacitiva.

La impedancia característica (Z_C) y constante de fase (β) de línea con compensación “shunt” uniformemente distribuida resultan:

$$Z_C' = \frac{Z_C}{\sqrt{1 - k_{sh}}} \quad (2.31)$$

$$\beta' = \beta \left(\sqrt{1 - k_{sh}} \right) \quad (2.32)$$

Por lo tanto, la compensación “shunt” inductiva incrementa la impedancia característica de la línea y disminuye la constante de fase y la compensación “shunt” capacitiva disminuye la impedancia característica de la línea y aumenta la constante de fase.

La capacitancia en una línea presenta dos efectos en el voltaje, el primero es el efecto Ferranti, y el segundo es el efecto de elevación de la tensión debido a la corriente capacitiva que fluye a través de las impedancias de las fuentes en los extremos de la línea. Adicionalmente en baja carga la combinación de estos efectos pueden producir sobretensiones indeseables.

La compensación shunt inductiva es así un método efectivo para controlar este nivel de tensión. Los reactores absorben potencia reactiva y mitigan las sobretensiones durante

condiciones de carga ligera. También reducen las sobretensiones transitorias debidas a las maniobras de interruptores y a la caída de rayos, sin embargo los reactores pueden reducir la capacidad de transporte si no se desconectan en condiciones de plena carga.

2.2.6 Efecto de la compensación sobre la tensión de la línea y la potencia máxima

En la Fig. 2.10 se muestra una línea de “ l ” km sin pérdidas, cuyas tensiones de envío y recepción son V_S y V_R . La tensión en el punto medio de la línea es V_m y la potencia transmitida es P .

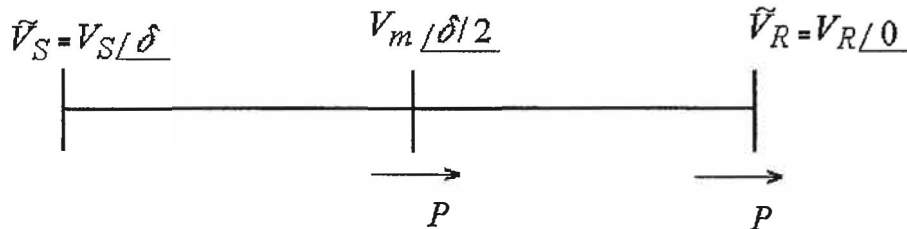


Fig. 2.10 Línea de transmisión de “ l ” km sin pérdidas

Si se supone que V_S y V_R son iguales a 1.0 p.u., las expresiones de potencia y tensión en el punto medio de la línea de transmisión no-compensada son:

$$P = \frac{P_0}{\text{sen}\theta} \text{sen}\delta \quad (2.33)$$

$$V_m = \frac{P}{P_0} \frac{\text{sen}(\theta/2)}{\text{sen}(\delta/2)} \quad (2.34)$$

Utilizando compensación “shunt” distribuida se tiene:

$$P = \frac{P_0 \sqrt{1 - k_{sh}}}{\text{sen}\theta'} \text{sen}\delta \quad (2.35)$$

$$V_m = \frac{P}{P_0} \frac{1}{\sqrt{1 - k_{sh}}} \frac{\text{sen}(\theta'/2)}{\text{sen}(\delta/2)} \quad (2.36)$$

Utilizando compensación serie capacitiva distribuida se tiene:

$$P = \frac{P_0}{\sqrt{1 - k_{se}} \text{sen}\theta'} \text{sen}\delta \quad (2.37)$$

$$V_m = \frac{P}{P_0} \sqrt{1 - k_{se}} \frac{\text{sen}(\theta'/2)}{\text{sen}(\delta/2)} \quad (2.38)$$

Una compensación shunt inductiva disminuye P_0 (Z_C es aumentada) y disminuye θ y una compensación shunt capacitiva aumenta P_0 (Z_C es disminuida) y aumenta θ . Solo la compensación serie contribuye a aumentar P_0 (Z_C es disminuida) y disminuir θ logrando un mayor efecto sobre la potencia máxima de transferencia.

2.2.7 Compensadores

Es útil distinguir entre compensadores activos y pasivos.

Los compensadores pasivos incluyen reactancias y condensadores, en serie o en shunt. Estos dispositivos pueden estar conectados de forma permanente, o pueden ser conectables. Aparte de su conexión o desconexión, no es posible controlarlos.

Los compensadores activos son, generalmente, dispositivos conectados en shunt que son capaces de mantener una tensión constante en sus terminales. Lo logran generando o absorbiendo precisamente la cantidad requerida de potencia reactiva en respuesta a las variaciones de tensión en su punto de conexión. Normalmente son capaces de un control fino de la tensión y respuesta rápida.

Entre los compensadores activos destacan los condensadores síncronos (maquinas síncronas incapaces de generar potencia activa al carecer de turbina) y, sobre todo, los compensadores estáticos (SVC: Static Var Compensator).

Los SVC son condensadores y reactancias cuyo valor puede ser modulado mediante un sistema electrónico. Existen dos técnicas principales para conseguir una susceptancia variable tal como se muestra en la Fig. 2.11.

- Thyristor Switched Capacitor (Capacitor controlado por tiristor, TSC): un número variable de condensadores se conectan al sistema utilizando tiristores como interruptores.

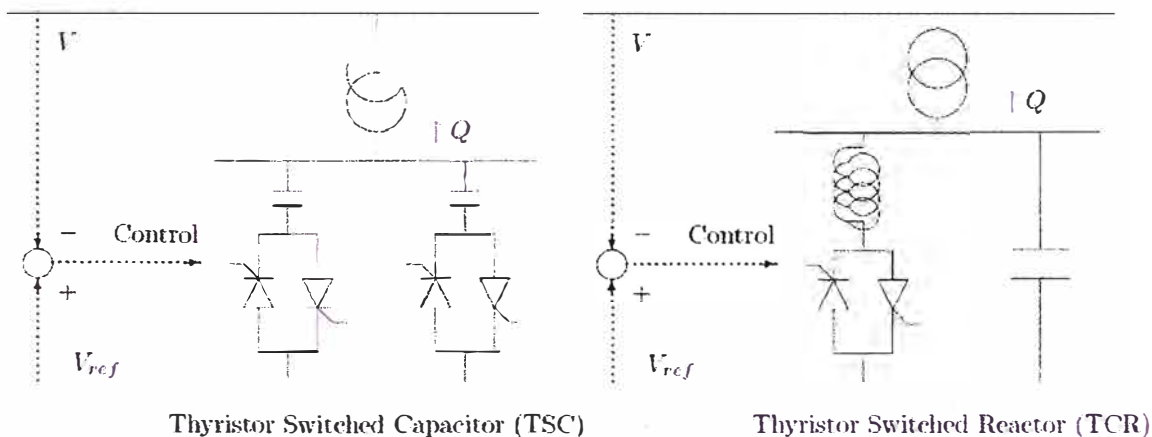


Fig. 2.11 Compensadores Static Var

- Thyristor Controlled Reactor (Reactor controlado por tiristor, TCR): se controla el ángulo de disparo de los tiristores para modular la componente principal de la corriente que circula por una reactancia colocada en serie. Los armónicos se filtran mediante un sistema adicional. Este sistema es equivalente a tener una reactancia variable en paralelo con un condensador constante.

En la Tabla N° 2.2, se muestran las ventajas y desventajas del sistema de los diferentes tipos de compensación para los sistemas de transmisión.

TABLA N° 2.2 Ventajas y desventajas en los tipos de compensación

Equipo de compensacion	Ventajas	Desventajas
Reactor shunt	Simple	Valor fijo
Capacitor shunt	Simple	Valor fijo Conmutacion de transitorios
Capacitor serie	Simple	Requiere proteccion de sobretension y filtro subarmónicos Capacidad de sobrecarga limitada
Condensador Sincrono	Tiene usualmente capacidad de sobrecarga Regulacion fina Bajos armonicos	Requiere de mayor mantenimiento Respuesta lenta Pesado
Reactor polifasico saturado	Construccion Robusta Capacidad larga de sobrecarga Bajos armonicos	Valor fijo Ruido
TCR	Respuesta rapida Totalmente controlable No efectos en nivel de falla	Requiere capacitores shunt/filtros Genera armonicos
TSC	No armonicos	Capacidad absorcion no inherente para limitar sobrevoltajes Resonancia de baja frecuencia con el sistema

CAPITULO III

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 Descripción del Problema

El ingreso al SEIN de la línea de transmisión L-5006, permitirá el descongestionamiento del sistema de transmisión entre la zona Costa Centro y la zona Norte, pero inyectará reactivos al sistema (debido al efecto capacitivo de la línea), razón por la cual se evalúa y revisa la compensación reactiva propuesta para tener perfiles de tensiones adecuados.

En el presente informe se analiza este caso desde el punto de vista de aplicación de una metodología para mitigar las sobretensiones que aparecen en el extremo abierto del tramo de línea (efecto Ferranti) y el aumento de la capacidad de transporte de la línea de transmisión.

3.1.1 Área de influencia

La línea de transmisión L-5006 que interconecta la S.E. Carabayllo con S.E. Chimbote Nueva permitirá descongestionar la línea de 220 kV Zapallal – Paramonga – Chimbote – Trujillo, y también será la línea principal para la transferencia de potencia entre la zona Costa Centro y la zona Norte.

3.1.2 Línea de Transmisión L - 5006

De acuerdo a la ficha del proyecto de Línea de Transmisión 500 kV Zapallal (Carabayllo) – Trujillo, obtenido de la página web de Osinergmin (www.osinerg.gob.pe), se tienen los siguientes datos técnicos:

Tensión nominal: 500 kV

Capacidad: 750 MVA

Capacidad mínima de transmisión (según contrato): 600 MVA

Capacidad en contingencia: 1000 MVA (por un periodo de 30 min)

Longitud: 378 km (Carabayllo – Chimbote) y 146 km (Chimbote – Trujillo)

Nro. de circuitos: 1 (simple terna)

Nro. de conductores por fase: 4

Configuración: Horizontal

Conductor: ACAR 800 MCM

Cable de guarda: 1 OPGW

3.1.3 Subestación Carabaylo 500 kV

La subestación de Carabaylo, está ubicado en el distrito de Carabaylo, provincia de Lima y Departamento de Lima a 246 msnm. De la S.E. Chilca llega la línea L-5001 y del diámetro 3 sale la línea L-5006 hacia S.E. Chimbote Nueva. Tiene configuración de barras tipo interruptor y medio. En la Fig. 3.1 se ve una vista panorámica de la S.E. Carabaylo.



Fig. 3.1 Vista panorámica de la S.E. Carabaylo 500 kV – Diámetro 3

3.1.4 Subestación Chimbote Nueva 500 kV

La subestación de Chimbote Nueva, está ubicado en el distrito de Chimbote, provincia de Santa y Departamento de Ancash a 198 msnm. En la S.E. Chimbote Nueva llega la línea L-5006 y sale la línea L-5008 hacia la subestación Trujillo Nueva. Tiene una configuración de barras tipo interruptor y medio. En la Fig. 3.2 se muestra una vista panorámica de la S.E. Chimbote Nueva.



Fig. 3.2 Vista panorámica de la S.E. Chimbote Nueva 500 kV

En la Fig. 3.3 se muestran las áreas operativas del Sistema Interconectado Nacional (SEIN) a finales del año 2012, en la cual se puede apreciar la línea L-5006 que interconecta el sistema Centro Norte con el Sistema Norte.

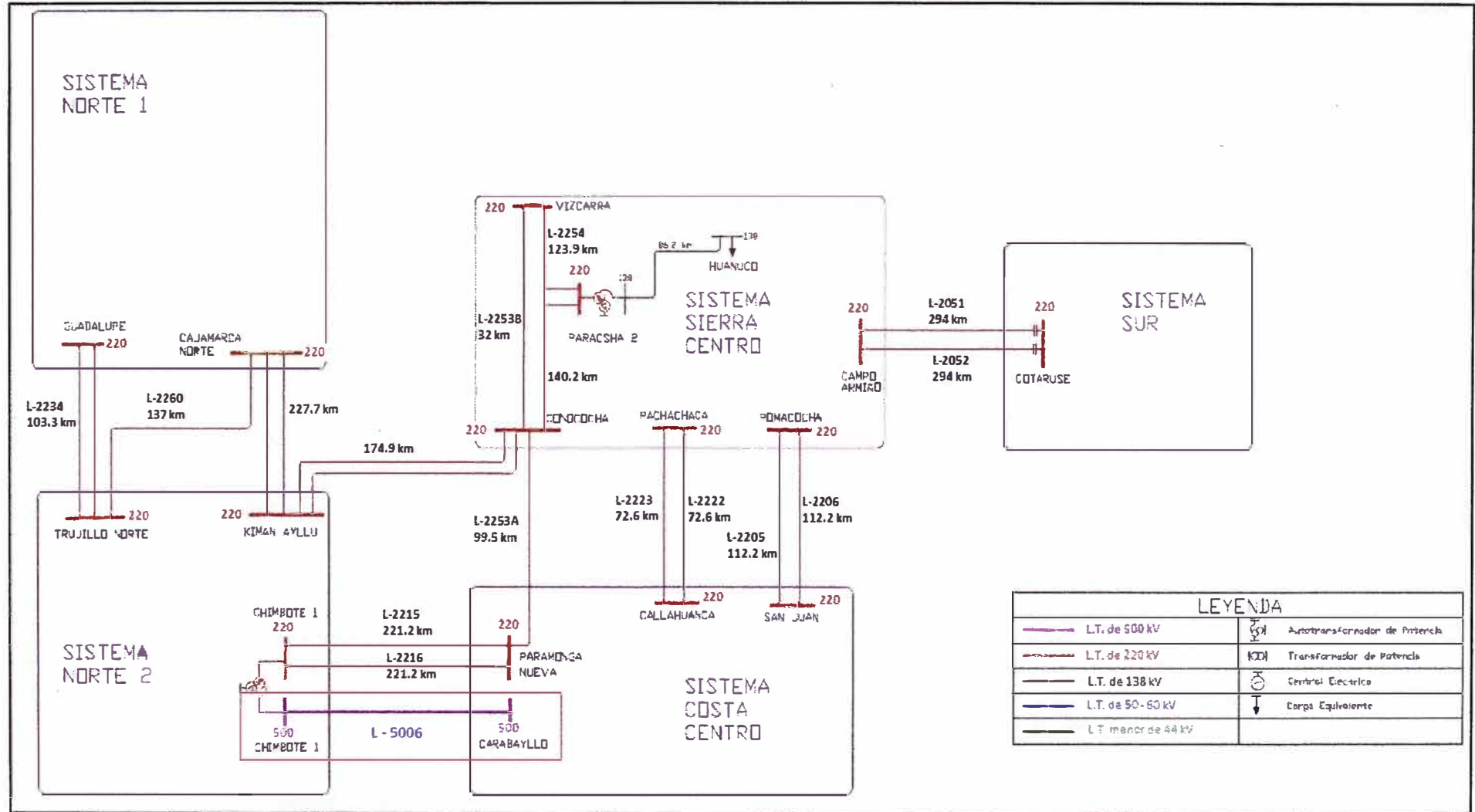


Fig. 3.3 Áreas operativas del SEIN, a finales del 2012

3.1.5 Configuración eléctrica de la Línea de Transmisión L - 5006

De acuerdo a la ficha del proyecto publicado por Osinergmin, en la Fig. 3.4 se muestra la configuración eléctrica propuesta para la línea de transmisión L – 5006 (S.E. Carabayllo – S.E. Chimbote).

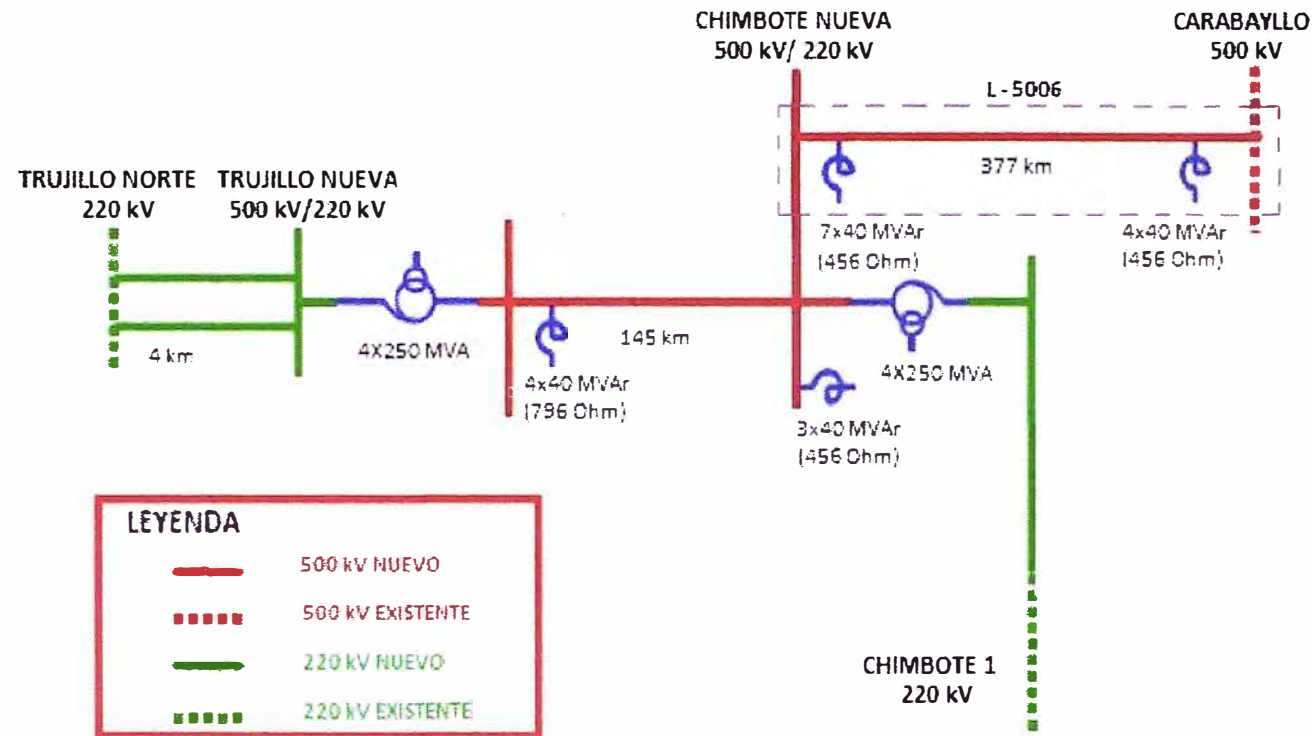


Fig. 3.4 Configuración eléctrica de la L.T. 500 kV Zapallal (Carabayllo) - Trujillo

Se observa que se tiene los siguientes reactores inductivos:

S.E. Carabayllo: R-17: 3x40 MVAR y 1x40 MVAR de reserva

S.E. Chimbote Nueva: R-18: 3x40 MVAR, R-19: 3x40 MVAR y 1x40 MVAR de reserva, R-20: 3x40 MVAR

S.E. Trujillo Nueva: R-21: 3x40 MVAR y 1x40 MVAR de reserva

3.2 Criterios

Se adoptan criterios de acuerdo a la reglamentación vigente determinada por el COES dentro de la Propuesta del Primer Plan de Transmisión, periodo 2011 – 2020 y los alcances LT 500 kV Carabayllo – Chimbote Nueva – Trujillo Nueva.

Los niveles de tensión en las barras de carga y subestaciones del SEIN no deben ser inferior a 0.95 p.u. ni superior al 1.05 p.u. del valor nominal en cada subestación.

La tensión máxima permitida en el extremo abierto de la línea, será determinada basándose en la capacidad de sobretensión de los equipos instalados en ese extremo (transformadores de tensión, pararrayos, aisladores, etc.).

3.3 Metodología

Con el fin de observar el comportamiento de la potencia reactiva en la línea de transmisión Carabayllo – Chimbote 500 kV, mediante simulaciones de flujos de cargas se hacen estudios de sensibilidad de la capacidad nominal de los elementos constitutivos (línea de transmisión, reactores de línea, reactores de barra), observando niveles de tensión y cargabilidad en la transmisión de potencia.

Para un adecuado control de la tensión en las barras de las subestaciones asociadas a la línea de transmisión del proyecto L.T. 500 kV Carabayllo – Chimbote Nueva – Trujillo Nueva y control de los reactivos generados por el efecto capacitivo de la línea de transmisión, se instalaron los siguientes equipos de compensación reactiva:

3.3.1 Compensación con Reactores de Línea

En el tramo de salida de la S.E. Carabayllo, en el tramo de llegada a la S.E. Chimbote Nueva y el tramo de llegada a la S.E. Trujillo Nueva se instalaron reactores de línea (inductivos). Para ajustar los valores de los reactores de línea, se realizan simulaciones del efecto Ferranti con el fin de observar las sobretensiones que aparecen en el extremo abierto de la línea de transmisión. La capacidad del reactor de línea en el extremo de envío permanece fija, mientras se varía la capacidad del reactor de línea en el extremo abierto hasta que la tensión elevada por efecto Ferranti entre en el rango de criterios establecidos por el COES. Se simulan flujos de carga en condiciones de máxima y mínima demanda para condiciones de avenida y estiaje; efectuadas para el horizonte de planeamiento de expansión vigente del COES, obteniendo resultados para los dos años de estudio (2013 – 2016). En la Tabla N° 3.1 se muestran los casos considerados para realizar los estudios en los reactores de Línea.

3.3.2 Compensación con Reactores de Barra

De acuerdo a la configuración eléctrica la línea del proyecto L.T. 500 kV Carabayllo – Chimbote Nueva – Trujillo Nueva, se instala un reactor de barra en la S.E. Chimbote Nueva. Para ajustar el valor del reactor de Barra se realizaran simulaciones de flujos de cargas con el fin de observar las sobretensiones o bajas tensiones en las subestaciones asociadas. En la tabla N° 3.2 se muestran los casos considerados para realizar el estudio en el reactor de Barra.

3.3.3 Compensación Serie

De acuerdo a la configuración eléctrica la línea del proyecto L.T. 500 kV Carabayllo – Chimbote Nueva – Trujillo Nueva, no están considerados equipos de compensación serie capacitiva, esto se debe a que en la subestaciones asociadas no hay problemas de tensión, no hay necesidad de aumentar la capacidad de transporte y por lo general se aplican a líneas de transmisión de longitud mayor a 500km. No es objetivo del presente informe demostrar el mejoramiento de la estabilidad transitoria de la línea.

Tabla N° 3.1 Casos de estudio considerados para estudios en reactores de línea

Caso	Condición de Despacho	Demanda	Extremo de envío	Extremo abierto	Barra de Chimbote
1	Avenida	Máxima	Carabayllo	Chimbote	Sin reactor de barra
		Mínima			
2	Estiaje	Máxima			
		Mínima			
3	Avenida	Máxima	Chimbote	Carabayllo	
		Mínima			
4	Estiaje	Máxima			
		Mínima			

Tabla N° 3.2 Casos de estudio considerados para estudios en reactores de barra

Caso	Condición de Despacho	Demanda	Descripción
1	Avenida	Máxima	Variando Reactor de barra S.E. Chimbote
		Mínima	
2	Estiaje	Máxima	
		Mínima	

3.4 Información utilizada

3.4.1 Sistema Eléctrico Interconectado Nacional

Archivo (pdf) del software DIGSILENT, elaborado para estudios eléctricos para los años 2012 al 2016. En este archivo se encuentra el modelo del Sistema Eléctrico

Interconectado Nacional (SEIN) para las condiciones hidrológicas de avenida y estiaje en los escenarios de máxima y mínima demanda. Este archivo fue obtenido de la página web del COES (www.coes.org.pe).

Fichas de nuevos proyectos de transmisión y ampliaciones que viene ejecutando las empresas REP, CTM e ISA Perú.

Informe del Primer Plan de Transmisión 2011 – 2020 desarrollado por el COES.

CAPITULO IV

APLICACIÓN DE UN CASO PRÁCTICO Y RESULTADOS

4.1 Línea de Transmisión L-5006 energizada en vacío sin compensación

Los parámetros eléctricos de la línea de transmisión L-5006 son:

- Resistencia serie por unidad de longitud: $r = 0.0203 \Omega/\text{km}$
- Reactancia serie por unidad de longitud: $x_L = 0.317 \Omega/\text{km}$
- Susceptancia shunt por unidad de longitud: $b_C = 5.21085 \mu\text{S}/\text{km}$
- Conductancia shunt por unidad de longitud $g \approx 0.00 \text{ mS}/\text{km}$

De acuerdo a estos datos obtenidos que se tienen de la L.T. L-5006, se obtiene que:

$$Z_C = \sqrt{\frac{x_L}{b_C}} = \sqrt{\frac{0.317}{5.21085 \times 10^{-6}}} \approx 247 \text{ ohm}$$

$$P_0 = \frac{V^2}{Z_C} = \frac{(500)^2}{247} \approx 1012 \text{ MW}$$

$$\beta = \sqrt{x_L b_C} = \sqrt{(0.317)(5.21085 \times 10^{-6})} \approx 0.00129 \text{ rad/km}$$

Considerando el caso de una línea sin pérdidas de longitud $l = 378 \text{ km}$ y en circuito abierto (energización en vacío), se tiene que la tensión en función de la distancia a la barra de recepción es $V(x) = 1.13 \cos(0.00129x) \text{ pu}$, tal como se muestra en la Fig. 4.1.

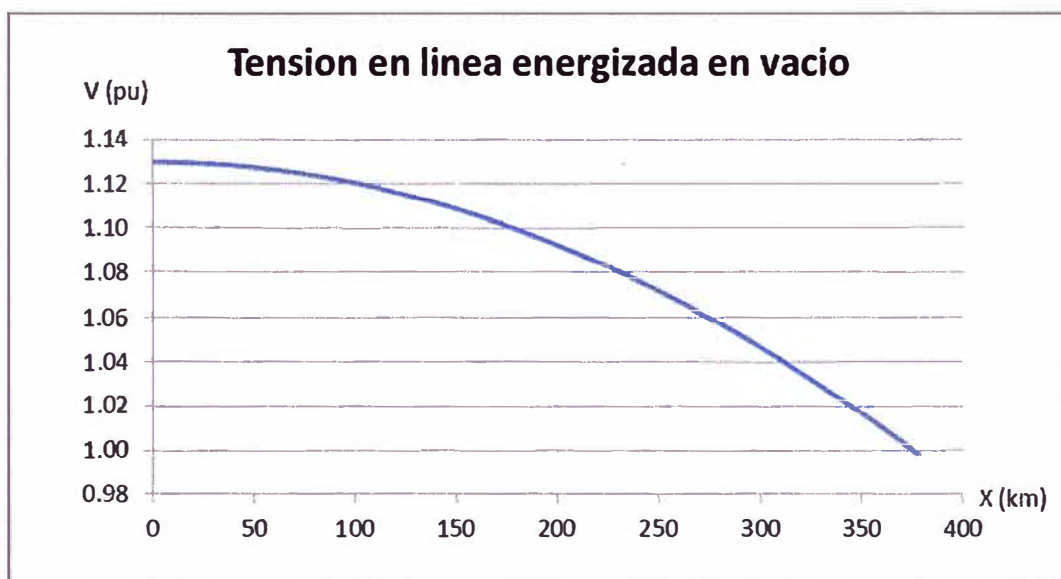


Fig. 4.1 Tensión en circuito abierto en función a la distancia a la barra de recepción.

En la Fig. 4.2 se muestra la corriente en función de la distancia a la barra de recepción,

$$I(x) = 1.13 \text{ sen}(0.00129x) \text{ pu}$$

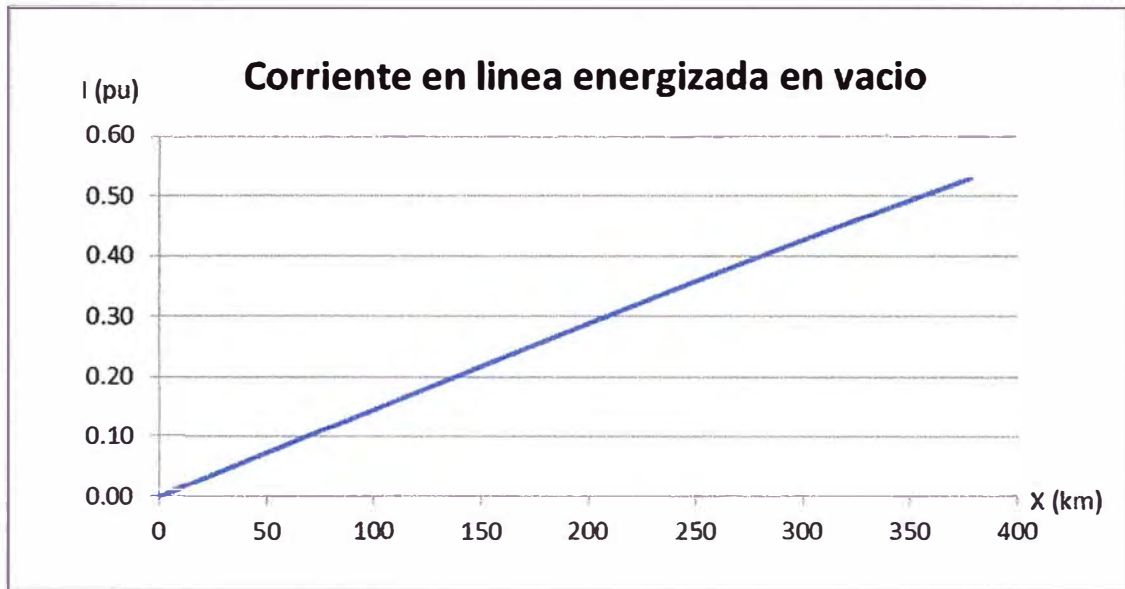


Fig. 4.2 Corriente en circuito abierto en función a la distancia a la barra de recepción.

De la cual podemos interpretar que en el extremo abierto de la línea L-5006, existirá una sobretensión de 1.13 p.u. (565 kV), debido al efecto capacitivo de la línea de transmisión L-5006 (efecto Ferranti).

Para $x = 378$ (longitud total de la línea), se tiene que la $I_s = 0.487$ p.u., por lo que se puede decir que la línea está inyectando al sistema una potencia reactiva de 0.487 p.u., lo cual es significativo.

Considerando una potencia natural igual a $P_0 = 1012$ MW (obtenida en la ecuación anterior), se tiene una potencia reactiva inyectada por la línea de 492.84 MVAR, por regla práctica se compensa máximo en un 80% de la potencia natural de la línea, entonces se debe compensar aproximadamente 394 MVAR.

4.2 Esquema del Sistema Eléctrico a Analizar

En la Fig. 4.3 se muestra el sistema eléctrico el cual se analiza dependiendo de los escenarios descritos:

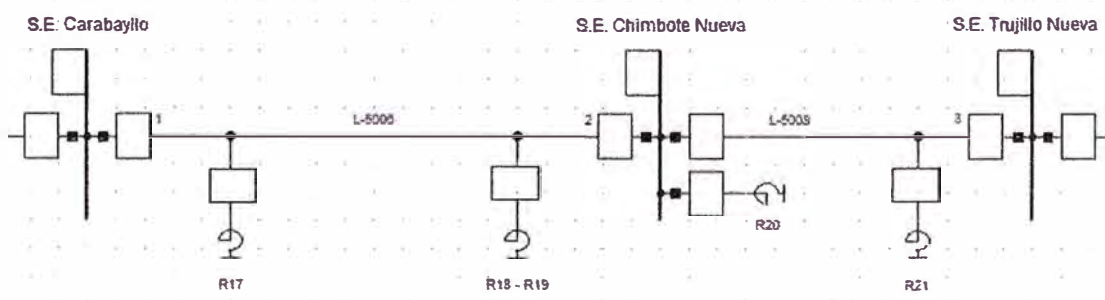


Fig. 4.3 Esquema de la L.T. 500 kV Carabayllo – Chimbote - Trujillo

4.3 Análisis de las simulaciones realizadas

De acuerdo a la metodología descrita, se realizó las simulaciones para los escenarios de avenida y estiaje en máxima y mínima demanda para los años 2013 y 2016.

4.3.1 Compensación reactiva variable en S.E. Chimbote Nueva sin compensación de barra en S.E. Chimbote Nueva

- Se tomara los valores de tensión en la barra de Chimbote Nueva considerando $Q_{R17} = 120$ MVAR en condiciones de avenida, como se muestra en la Fig. 4.4.

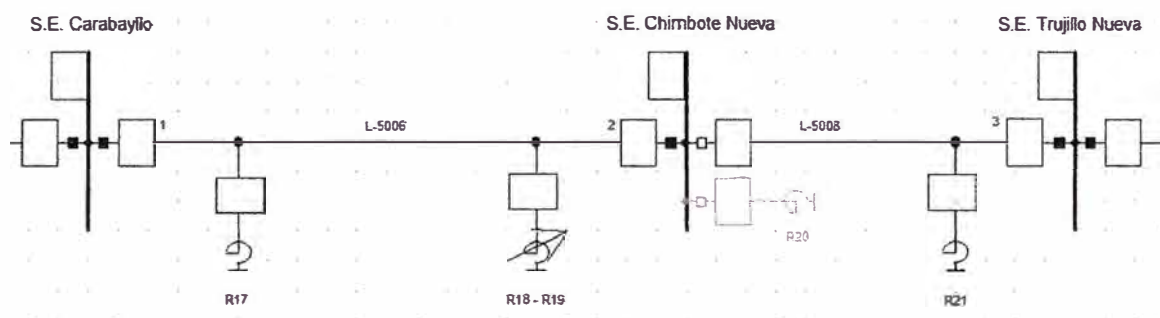


Fig. 4.4 Tensión en circuito abierto en la barra de Chimbote Nueva

En la Tabla N° 4.1 se tabula la tensión en la barra S.E. Chimbote Nueva para cada valor de $Q_{R18,R19}$.

Tabla N° 4.1 Niveles de Tensión en Extremo Abierto S.E. Chimbote Nueva, Extremo de envío S.E. Carabayllo ($Q_{R17} = 120$ MVAR) en avenida

Nivel de Tension Extremo Abierto S.E. Chimbote Nueva [p.u.]				
Condiciones de Avenida				
Potencia	Año 2013		Año 2016	
Reactiva	Maxima	Minima	Maxima	Minima
Chimbote Nueva [MVAR]	Demanda	Demanda	Demanda	Demanda
0	1.133	1.165	1.105	1.181
40	1.113	1.143	1.086	1.159
80	1.094	1.123	1.068	1.138
120	1.076	1.104	1.051	1.119
160	1.058	1.085	1.034	1.100
200	1.041	1.067	1.017	1.081
240	1.025	1.050	1.001	1.064
280	1.010	1.033	0.985	1.047
320	0.997	1.017	0.971	1.031
360	0.983	1.002	0.958	1.015
400	0.970	0.987	0.944	1.000

De la Fig. 4.5, podemos observar que para que V_R este dentro de los valores aceptables, se necesita instalar un reactor con $Q_{\min} = 240$ MVAR. En condiciones de mínima demanda la tensión en la barra Chimbote Nueva aumenta.

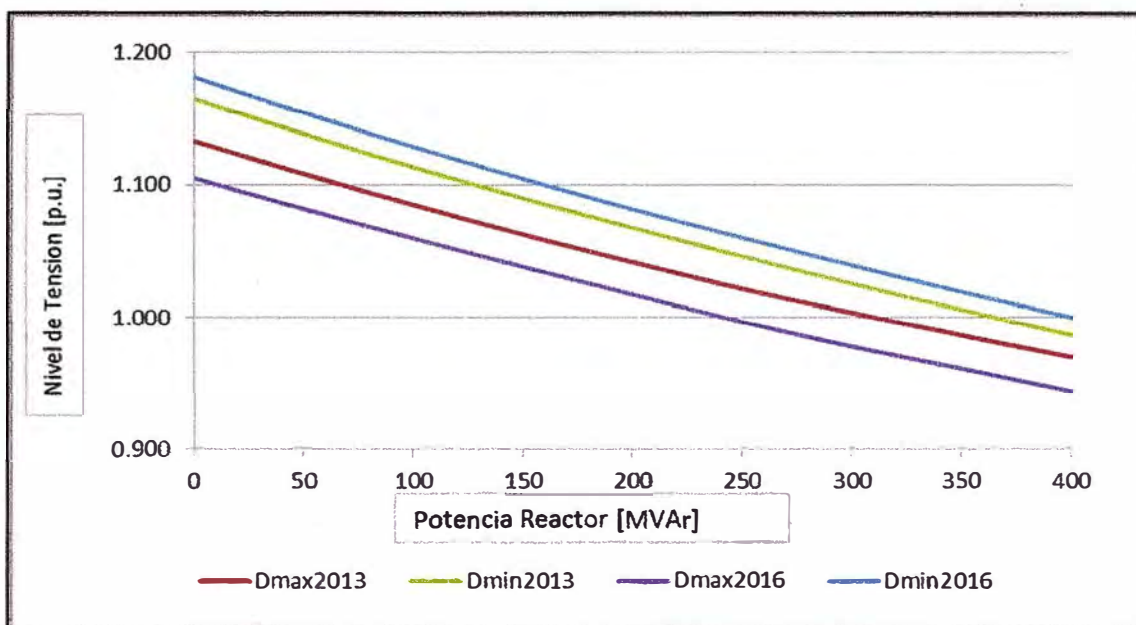


Fig. 4.5 Grafica de V_R S.E. Chimbote Nueva vs. Q reactor en avenida

- b. Se tomó los valores de tensión en la barra de Chimbote Nueva considerando $Q_{R17} = 120$ MVar en condiciones de estiaje, como se muestra en Fig. 4.4.

En la Tabla N° 4.2 se tabula la tensión en la barra S.E. Chimbote Nueva para cada valor de $Q_{R18,R19}$.

Tabla N° 4.2 Niveles de Tensión en Extremo Abierto S.E. Chimbote Nueva, Extremo de envío S.E. Carabayllo ($Q_{R17} = 120$ MVar) en estiaje

Nivel de Tension Extremo Abierto S.E. Chimbote Nueva [p.u.]				
Condiciones de Estiaje				
Potencia	Año 2013		Año 2016	
Reactiva	Maxima	Minima	Maxima	Minima
Chimbote Nueva [MVar]	Demanda	Demanda	Demanda	Demanda
0	1.112	1.146	1.104	1.156
40	1.092	1.125	1.087	1.137
80	1.073	1.104	1.070	1.119
120	1.055	1.084	1.054	1.101
160	1.038	1.064	1.039	1.084
200	1.022	1.046	1.024	1.068
240	1.007	1.028	1.009	1.052
280	0.994	1.012	0.995	1.036
320	0.980	0.995	0.981	1.022
360	0.967	0.980	0.968	1.007
400	0.954	0.965	0.955	0.993

De la Fig. 4.6, se puede ver que para que V_R este dentro de valores aceptables, se necesita instalar un reactor de $Q_{\min} = 240$ MVar. En condiciones de mínima demanda la tensión en la barra Chimbote Nueva aumenta.

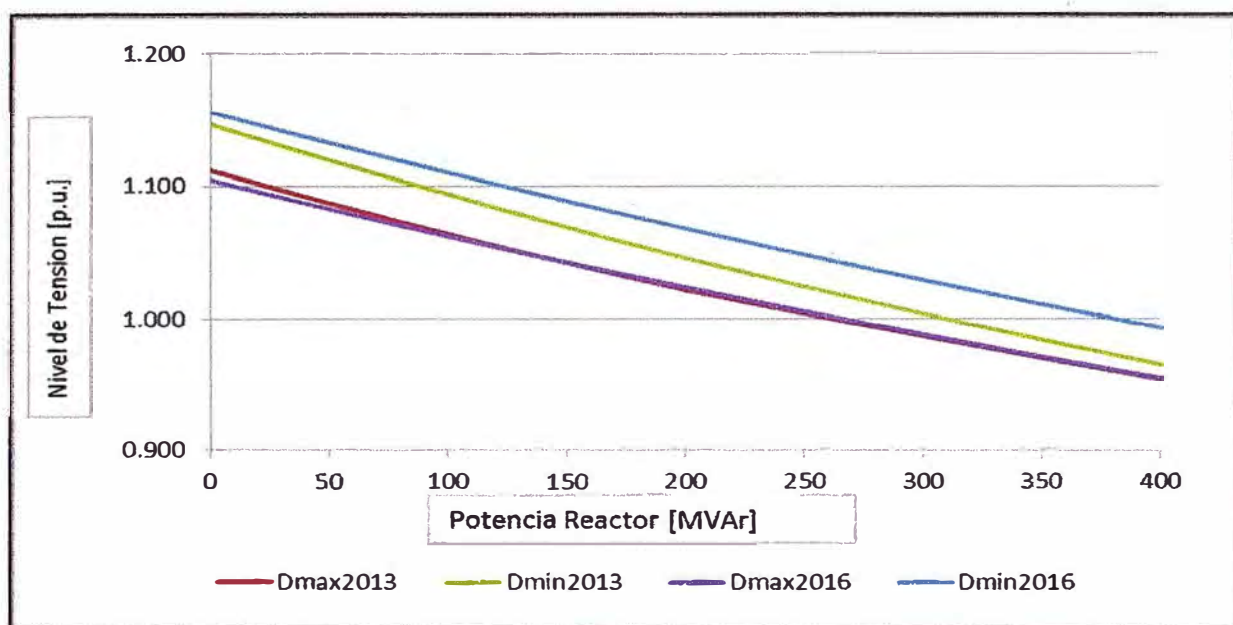


Fig. 4.6 Grafica de V_R S.E. Chimbote Nueva vs. Q reactor en estiaje

4.3.2 Compensación reactiva variable en S.E. Carabayllo sin compensación de barra en S.E. Chimbote Nueva

- Se tomó los valores de tensión en la barra de Carabayllo considerando $Q_{R18-R19} = 240$ MVAr en condiciones de avenida, como se muestra en la Fig. 4.7.

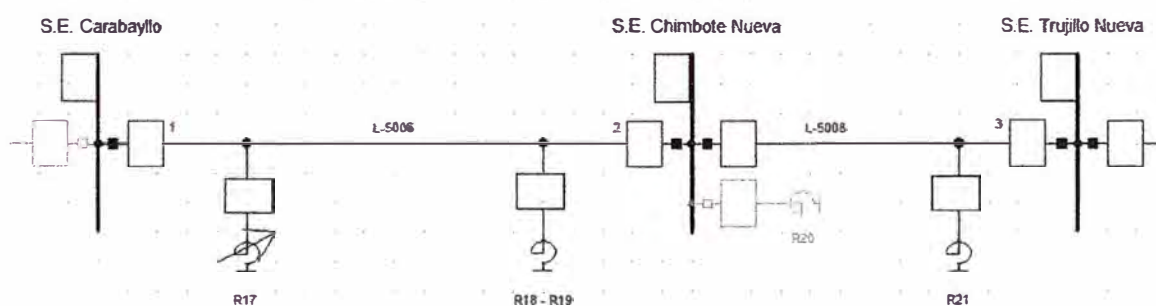


Fig. 4.7 Tensión en circuito abierto en la barra de Carabayllo

En la Tabla N° 4.3 se tabula la tensión en la barra S.E. Carabayllo para cada valor de Q_{R17} .

Tabla N° 4.3 Niveles de Tensión en Extremo Abierto S.E. Carabayllo, Extremo de envío S.E. Chimbote Nueva ($Q_{R18-R19} = 240$ MVAr) en avenida

Nivel de Tension Extremo Abierto S.E. Carabayllo [p.u.]				
Condiciones de Avenida				
Potencia Reactiva	Año 2013		Año 2016	
	Maxima	Minima	Maxima	Minima
Carabayllo [MVAr]	Demanda	Demanda	Demanda	Demanda
0	1.049	1.075	1.011	1.045
40	1.043	1.067	1.005	1.039
80	1.036	1.059	1.000	1.034
120	1.029	1.051	0.995	1.028

160	1.023	1.043	0.989	1.023
200	1.016	1.035	0.984	1.018
240	1.010	1.028	0.978	1.012
280	1.004	1.020	0.973	1.007
320	0.997	1.013	0.967	1.002
360	0.991	1.006	0.961	0.997
400	0.984	0.999	0.953	0.991

De la Fig. 4.8, se puede ver que para que V_R este dentro de los valores aceptables, se necesita instalar un reactor de $Q_{\min} = 120$ MVAR.

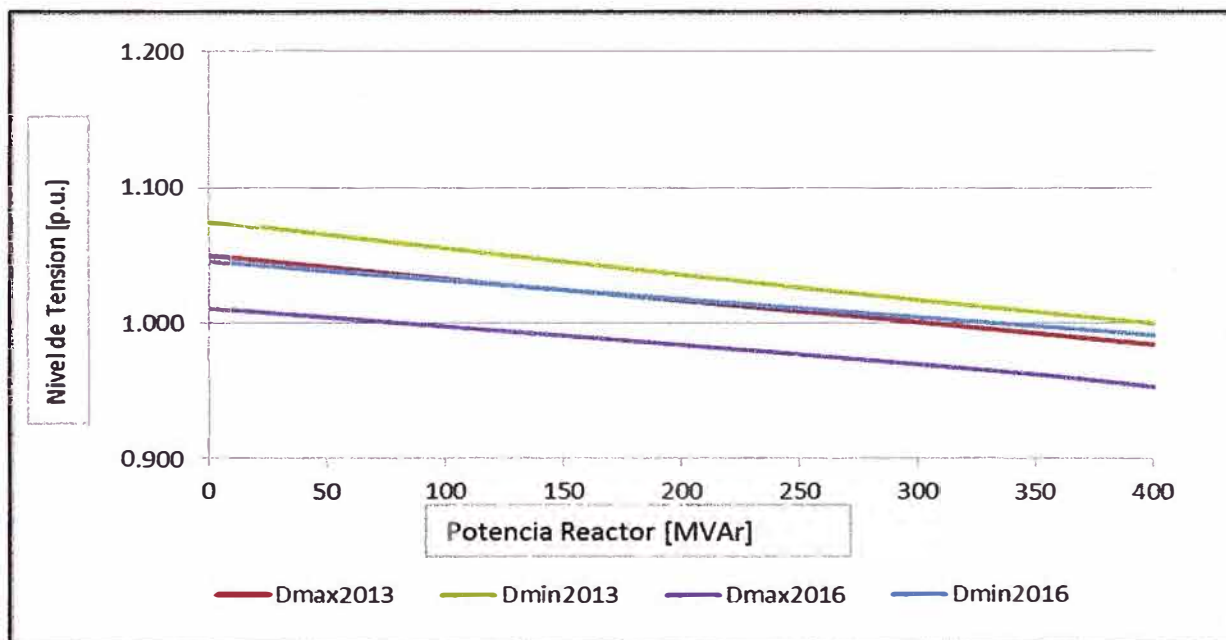


Fig. 4.8 Grafica de V_R S.E. Carabayllo vs. Q reactor en avenida

- b. Se tomó los valores de tensión en la barra de Carabayllo considerando $Q_{R18-R19} = 240$ MVAR en condiciones de estiaje, como se muestra en la Fig. 4.7.

En la Tabla N° 4.4 se tabula la tensión en la barra S.E. Carabayllo para cada valor de Q_{R17} .

Tabla N° 4.4 Niveles de Tensión en Extremo Abierto S.E. Carabayllo, Extremo de envío S.E. Chimbote Nueva ($Q_{R18-R19} = 240$ MVAR) en estiaje

Nivel de Tension Extremo Abierto S.E. Carabayllo [p.u.]				
Condiciones de Estiaje				
Potencia	Año 2013		Año 2016	
Reactiva	Maxima	Minima	Maxima	Minima
Carabayllo [MVAR]	Demanda	Demanda	Demanda	Demanda
0	1.029	1.044	1.009	1.044
40	1.023	1.036	1.004	1.039
80	1.017	1.028	1.000	1.035
120	1.011	1.020	0.995	1.030
160	1.005	1.013	0.991	1.026
200	0.999	1.006	0.987	1.021

240	0.994	0.999	0.982	1.017
280	0.988	0.992	0.978	1.012
320	0.982	0.986	0.974	1.008
360	0.976	0.980	0.970	1.004
400	0.970	0.974	0.966	0.999

De la Fig. 4.9, se observa que los valores de V_R están dentro de los márgenes aceptables.

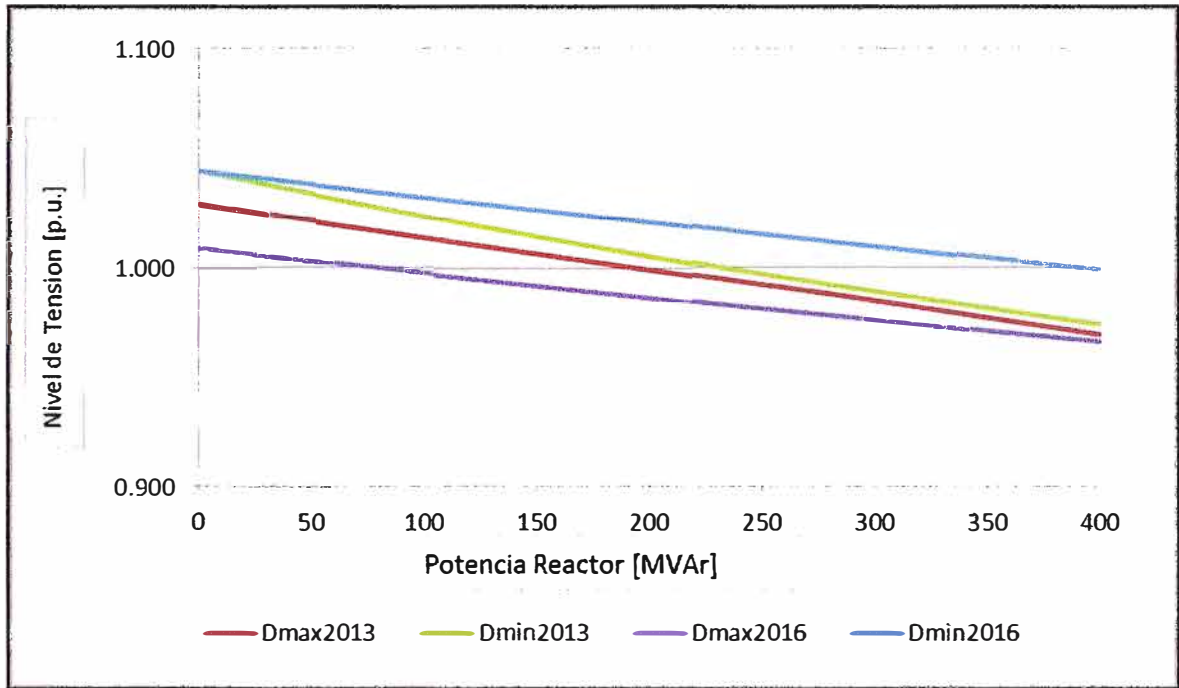


Fig. 4.9 Grafica de V_R S.E. Carabayllo vs. Q reactor en estiaje

4.3.3 Compensación reactiva variable de Barra en S.E. Chimbote Nueva

- a. Se tomó los valores de tensión en la barra de Chimbote Nueva considerando $Q_{R17} = 120$ MVAR, $Q_{R18} = 120$ MVAR, $Q_{R19} = 120$ MVAR en condiciones de avenida, como se muestra en la Fig. 4.10.

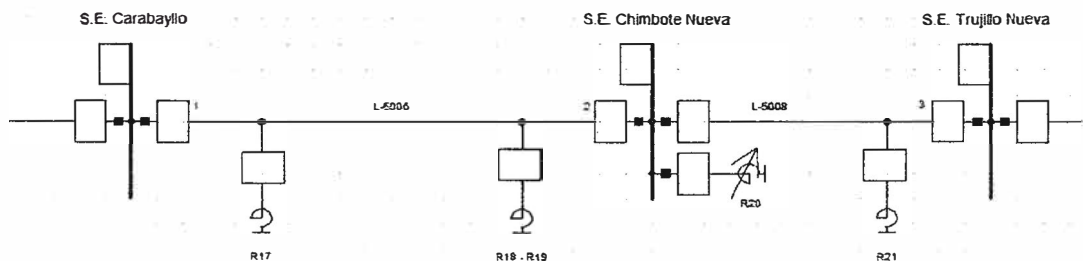


Fig. 4.10 Tensión en la barra de Chimbote Nueva

En la Tabla N° 4.5 se tabula la tensión en la barra S.E. Chimbote Nueva para cada valor de Q_{R20} .

De la Fig. 4.11, se obtiene un valor mínimo de $Q = 120$ MVAR para el reactor R-20. Para este valor de R-20, la tensión en la barra de S.E. Chimbote Nueva está dentro de los valores establecidos.

Tabla N° 4.5 Niveles de Tensión en S.E. Chimbote Nueva, variando el reactor de barra en la S.E. Chimbote Nueva Q_{R20} en avenida

Nivel de Tension S.E. Chimbote [p.u.]				
Condiciones de Avenida				
Potencia	Año 2013		Año 2016	
Reactiva	Maxima	Minima	Maxima	Minima
Chimbote [MVar]	Demanda	Demanda	Demanda	Demanda
0	1.041	1.063	1.036	1.098
40	1.030	1.047	1.026	1.083
80	1.019	1.032	1.017	1.069
120	1.008	1.020	1.008	1.056
160	0.998	1.010	0.998	1.046
200	0.986	0.999	0.986	1.036
240	0.974	0.989	0.975	1.027

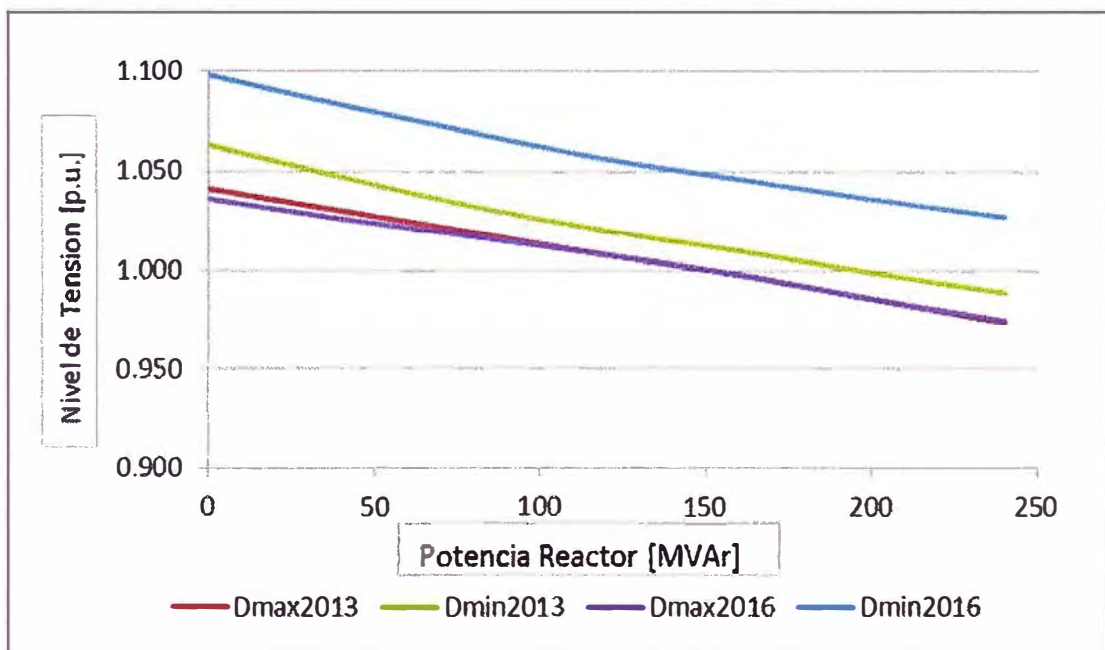


Fig. 4.11 Grafica de V_R S.E. Chimbote Nueva vs. Q reactor R-20 en avenida

- b. Se tomó los valores de tensión en la barra de Chimbote Nueva considerando $Q_{R17} = 120$ MVar, $Q_{R18} = 120$ MVar, $Q_{R19} = 120$ MVar en condiciones de estiaje, como se muestra en la Fig. 4.10.

En la Tabla N° 4.6 se tabula la tensión en la barra S.E. Chimbote Nueva para cada valor de Q_{R20} .

De la Fig. 4.12, se obtiene un valor mínimo de $Q = 120$ MVar para el reactor R-20. Para este valor de R-20, la tensión en la barra de S.E. Chimbote Nueva está dentro de los valores establecidos.

Tabla N° 4.6 Niveles de Tensión en S.E. Chimbote Nueva, variando el reactor de barra en la S.E. Chimbote Nueva Q_{R20} en estiaje

Nivel de Tension S.E. Chimbote [p.u.]				
Condiciones de Estiaje				
Potencia	Año 2013		Año 2016	
Reactiva	Maxima	Minima	Maxima	Minima
Chimbote [MVar]	Demanda	Demanda	Demanda	Demanda
0	1.028	1.043	1.043	1.088
40	1.017	1.027	1.030	1.075
80	1.007	1.016	1.021	1.063
120	0.996	1.005	1.012	1.051
160	0.984	0.994	1.004	1.041
200	0.971	0.984	0.995	1.032
240	0.959	0.972	0.985	1.023

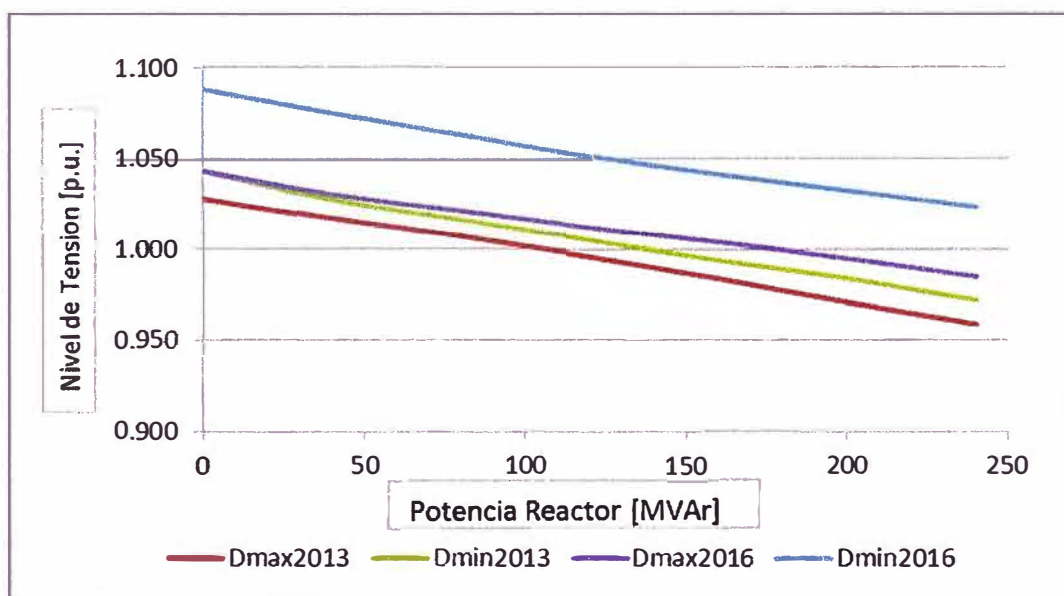


Fig. 4.12 Grafica de V_R S.E. Chimbote Nueva vs. Q reactor R-20 en estiaje

De las simulaciones realizadas se obtuvo un valor para el reactor R-20, $Q = 120$ MVar, se volvió a realizar la simulaciones para el ajuste de los reactores de Linea considerando el reactor de barra R-20 conectado a la S.E. Chimbote Nueva.

4.3.4 Compensación reactiva variable en S.E. Chimbote Nueva con compensación de la barra de Chimbote

- Se tomó los valores de tensión en la barra de Chimbote Nueva considerando $Q_{R17} = 120$ MVar en condiciones de avenida. En este caso se va a considerar el reactor $R_{20} = 120$ MVar conectado a la barra de Chimbote Nueva, como se muestra en la Fig. 4.13.

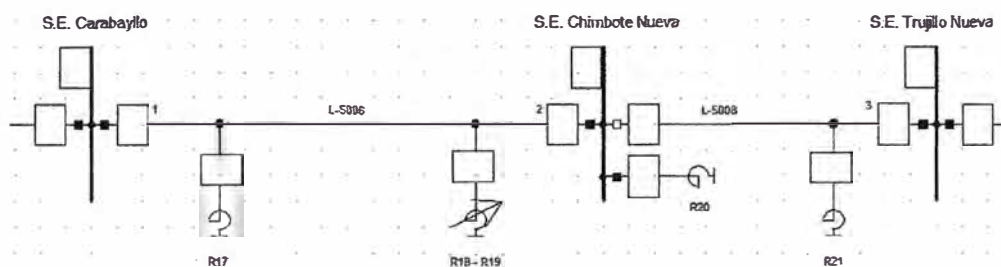


Fig. 4.13 Tensión en circuito abierto en la barra de Chimbote Nueva

En la Tabla N° 4.7 se tabula la tensión en la barra S.E. Chimbote Nueva para cada valor de $Q_{R18,R19}$ con $R_{20} = 120 \text{ MVar}$.

Tabla N° 4.7 Niveles de Tensión en Extremo Abierto S.E. Chimbote Nueva, Extremo de envío S.E. Carabayllo ($Q_{R17} = 120 \text{ MVar}$) en avenida

Nivel de Tension Extremo Abierto S.E. Chimbote Nueva [p.u.]				
Condiciones de Avenida				
Potencia	Año 2013		Año 2016	
Reactiva	Maxima	Minima	Maxima	Minima
Chimbote Nueva [MVar]	Demanda	Demanda	Demanda	Demanda
0	1.076	1.104	1.051	1.119
40	1.058	1.085	1.034	1.100
80	1.041	1.067	1.017	1.081
120	1.025	1.050	1.001	1.064
160	1.010	1.033	0.985	1.047
200	0.997	1.017	0.971	1.031
240	0.983	1.002	0.958	1.015
280	0.970	0.987	0.944	1.000
320	0.957	0.972	0.931	0.985
360	0.945	0.958	0.919	0.971
400	0.932	0.946	0.907	0.957

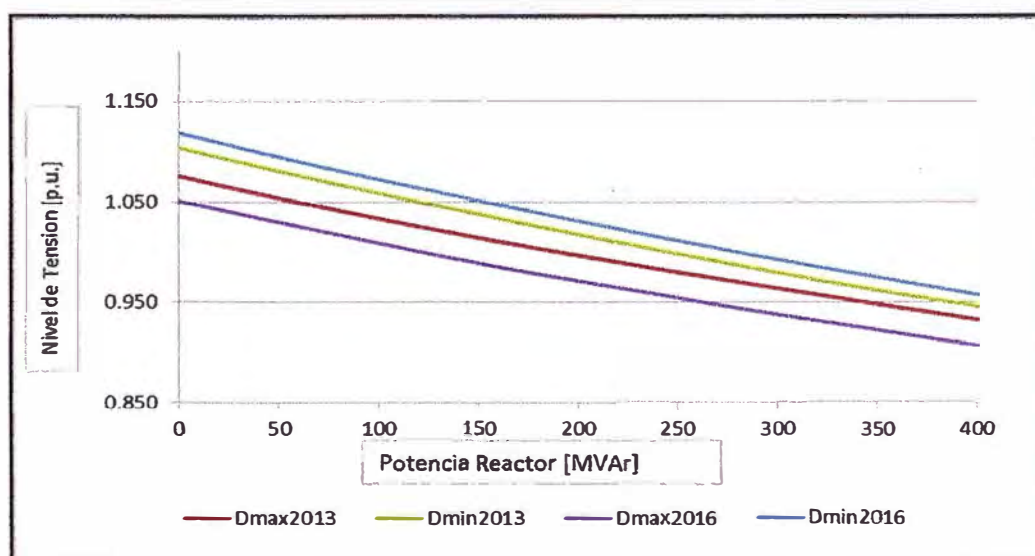


Fig. 4.14 Grafica de V_R S.E. Chimbote Nueva vs. Q reactor en avenida (considerando compensación en la barra Chimbote Nueva)

De la Fig. 4.14, se observa que el nivel de tensión se ha regulado en la S.E. Chimbote Nueva, pero la capacidad del reactor de línea no debe ser mayor 240MVAR

- b. Se tomó los valores de tensión en la barra de Chimbote Nueva considerando $Q_{R17} = 120$ MVAR en condiciones de estiaje. En este caso se va a considerar el reactor $R_{20} = 120$ MVAR conectado a la barra de Chimbote Nueva, como se muestra en la Fig. 4.13.

En la Tabla N° 4.8 se tabula la tensión en la barra S.E. Chimbote Nueva para cada valor de $Q_{R18,R19}$ con $R_{20} = 120$ MVAR.

Tabla N° 4.8 Niveles de Tensión en Extremo Abierto S.E. Chimbote Nueva, Extremo de envío S.E. Carabayllo ($Q_{R17} = 120$ MVAR) en estiaje

Nivel de Tension Extremo Abierto S.E. Chimbote Nueva [p.u.]				
Condiciones de Estiaje				
Potencia	Año 2013		Año 2016	
Reactiva	Maxima	Minima	Maxima	Minima
Chimbote Nueva [MVAR]	Demanda	Demanda	Demanda	Demanda
0	1.055	1.084	1.060	1.101
40	1.038	1.064	1.039	1.084
80	1.022	1.046	1.024	1.068
120	1.007	1.028	1.009	1.052
160	0.994	1.012	0.995	1.036
200	0.980	0.995	0.981	1.022
240	0.967	0.980	0.968	1.007
280	0.954	0.965	0.955	0.993
320	0.941	0.951	0.942	0.979
360	0.929	0.938	0.931	0.966
400	0.917	0.926	0.919	0.953

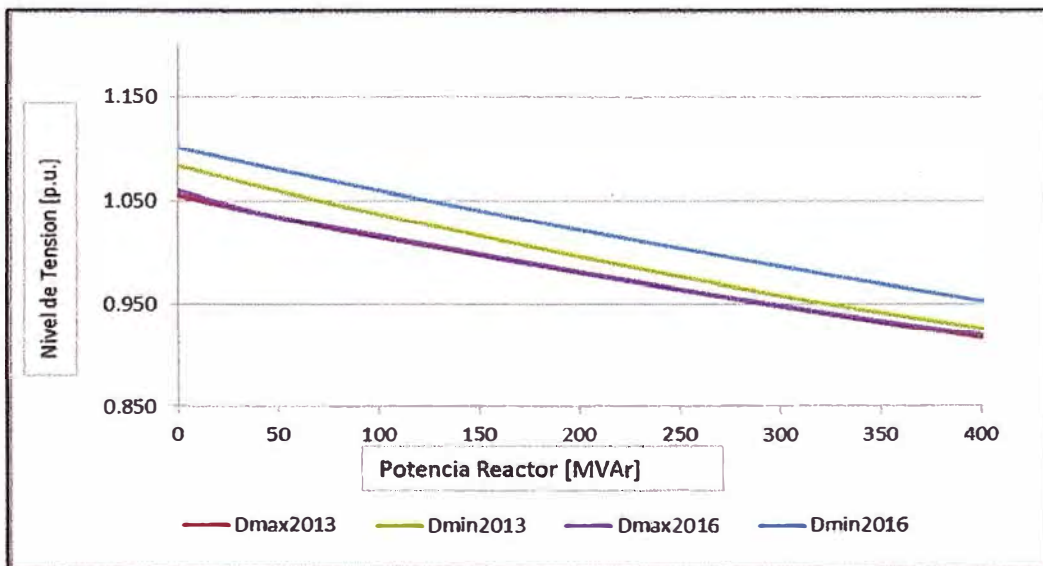


Fig. 4.15 Grafica de V_R en S.E. Chimbote Nueva vs. Q reactor en estiaje (considerando compensación en la barra Chimbote Nueva)

De la Fig. 4.15, se observa que el nivel de tensión se ha regulado en la S.E. Chimbote Nueva, pero la capacidad del reactor de línea no debe ser mayor 280MVar.

4.3.5 Compensación reactiva variable en S.E. Carabayllo con compensación de barra en S.E. Chimbote Nueva

- a. Se tomó los valores de tensión en la barra de Carabayllo considerando $Q_{R18-R19} = 240$ MVar en condiciones de avenida. En este caso se va a considerar el reactor $R_{20} = 120$ MVar conectado a la barra de Chimbote Nueva, como se muestra en la Fig. 4.16.

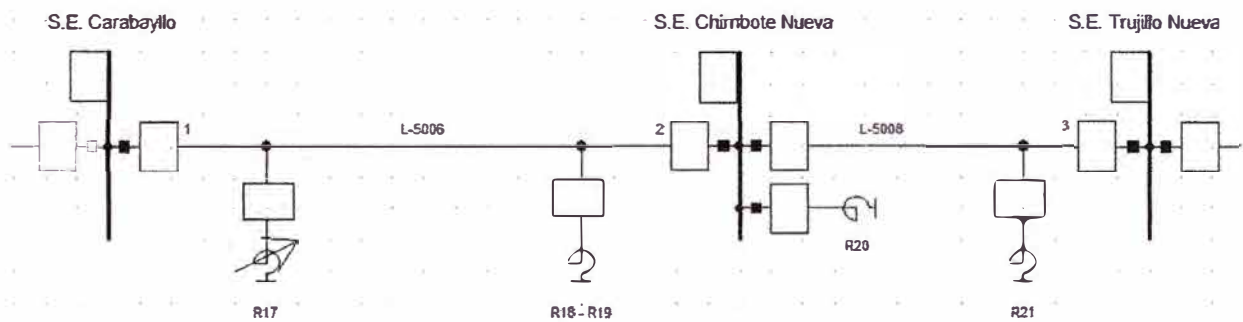


Fig. 4.16 Tensión en circuito abierto en la barra de Carabayllo

En la Tabla N° 4.9 se tabula la tensión en la barra S.E. Carabayllo para cada valor de Q_{R17} con $R_{20} = 120$ MVar.

Tabla N° 4.9 Niveles de Tensión en Extremo Abierto S.E. Carabayllo, Extremo de envío S.E. Chimbote Nueva ($Q_{R18-R19} = 240$ MVar) en avenida

Nivel de Tension Extremo Abierto S.E. Carabayllo [p.u.]				
Condiciones de Avenida				
Potencia	Año 2013		Año 2016	
Reactiva	Maxima	Minima	Maxima	Minima
Carabayllo [MVar]	Demanda	Demanda	Demanda	Demanda
0	1.039	1.059	1.003	1.034
40	1.032	1.052	0.998	1.029
80	1.026	1.044	0.993	1.023
120	1.020	1.037	0.987	1.018
160	1.013	1.030	0.982	1.013
200	1.007	1.023	0.976	1.008
240	1.001	1.016	0.970	1.003
280	0.994	1.009	0.964	0.998
320	0.987	1.003	0.957	0.993
360	0.980	0.996	0.944	0.987
400	0.973	0.990	no converge	0.982

De la Fig. 4.17, se observa que los niveles de tensión de la S.E. Carabayllo están dentro de los límites adecuados. Para $Q = 400$ MVar la simulación de flujo de carga no converge.

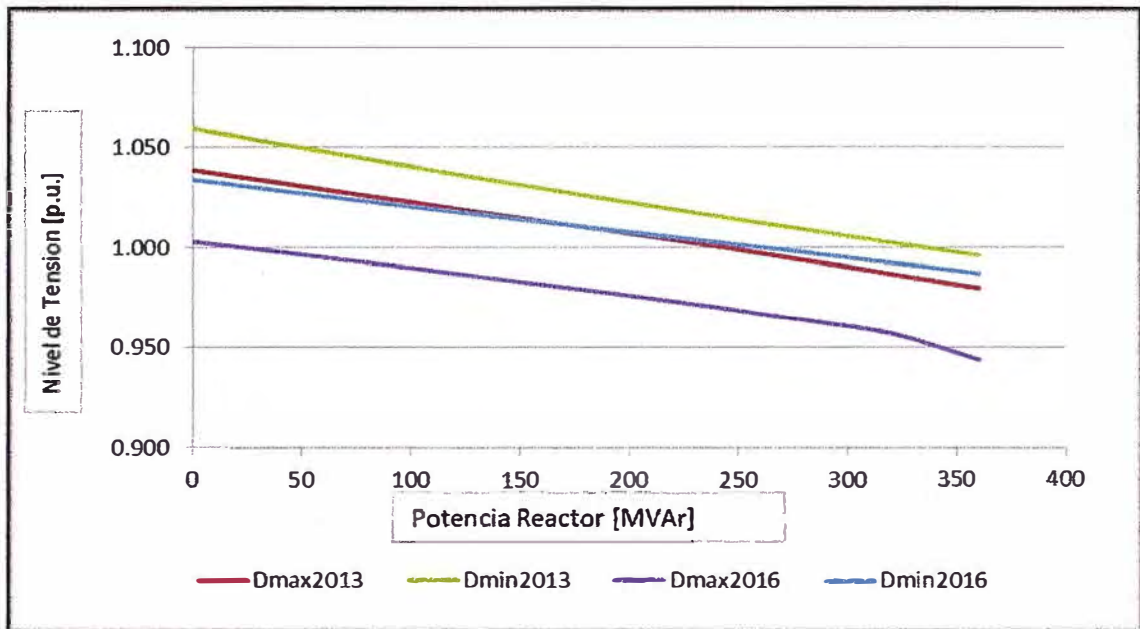


Fig. 4.17 Grafica de V_R S.E. Carabayllo vs. Q reactor en avenida (considerando compensación en la barra Chimbote Nueva)

- b. Se tomó los valores de tensión en la barra de Carabayllo considerando $Q_{R18-R19} = 240$ MVar en condiciones de estiaje. En este caso se va a considerar el reactor $R_{20} = 120$ MVar conectado a la barra de Chimbote Nueva, como se muestra en la Fig. 4.16.

En la Tabla N° 4.10 se tabula la tensión en la barra S.E. Carabayllo para cada valor de Q_{R17} con $R_{20} = 120$ MVar.

Tabla N° 4.10 Niveles de Tensión en Extremo Abierto S.E. Carabayllo, Extremo de envío S.E. Chimbote Nueva ($Q_{R18-R19} = 240$ MVar) en estiaje

Nivel de Tension Extremo Abierto S.E. Carabayllo [p.u.]				
Condiciones de Estiaje				
Potencia	Año 2013		Año 2016	
Reactiva	Maxima	Minima	Maxima	Minima
Carabayllo [MVar]	Demanda	Demanda	Demanda	Demanda
0	1.020	1.029	1.016	1.036
40	1.014	1.022	1.011	1.032
80	1.008	1.015	1.007	1.027
120	1.003	1.008	1.002	1.022
160	0.996	1.001	0.998	1.018
200	0.991	0.995	0.993	1.014
240	0.984	0.989	0.988	1.009
280	0.978	0.983	0.984	1.005
320	0.971	0.977	0.980	1.001
360	0.965	0.971	0.976	0.997
400	0.959	0.965	0.972	0.993

De la Fig. 4.18, se observa los niveles de tensión V_R en están dentro de los límites adecuados.

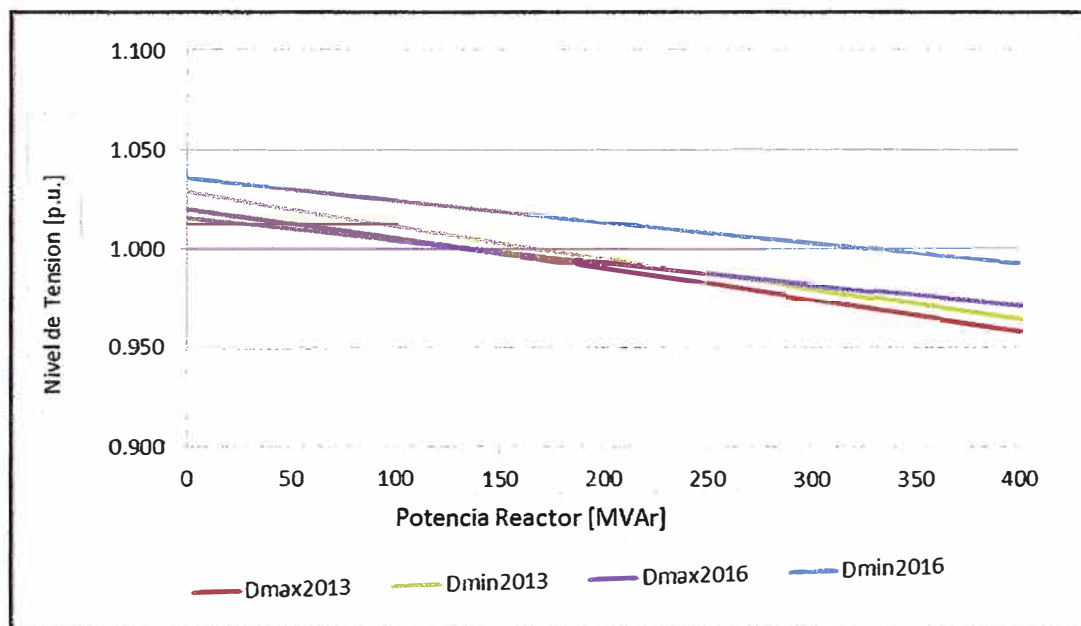


Fig. 4.18 Grafica de V_R en S.E. Carabayllo vs. Q reactor en estiaje (considerando compensación en la barra Chimbote Nueva)

4.4 Resultados

En base a las simulaciones analizadas, se verifica la necesidad de instalar los siguientes reactores en la línea de transmisión:

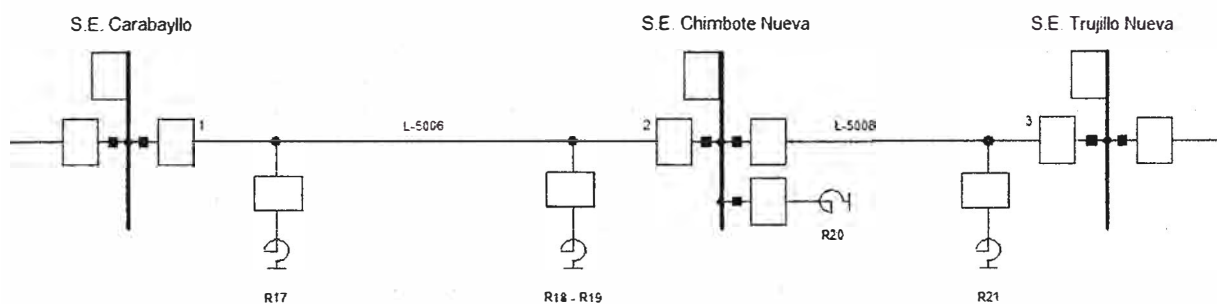


Fig. 4.19 Esquema de la L.T. 500 kV Carabayllo – Chimbote - Trujillo

Subestación Carabayllo: $R_{17} = 120$ MVar

Subestación Chimbote Nueva $R_{18} = 120$ MVar, $R_{19} = 120$ MVar

$R_{20} = 120$ MVar (Reactor de Barra)

De acuerdo al esquema los reactores R_{18} y R_{19} instalados en la barra de Chimbote Nueva también permiten mitigar el efecto capacitivo de la línea de transmisión L-5008 (S.E. Chimbote Nueva – S.E. Trujillo Nueva).

De las simulaciones realizadas para los escenarios 2013 y 2016 en estiaje y avenida, se tiene el siguiente las Tablas N° 4.11 y N° 4.12.

Tabla N° 4.11 Niveles de Tensión en las barras de Carabayllo y Chimbote Nueva sin reactor de barra en S.E. Chimbote Nueva

			Sin reactor de barra	
			S.E. Chimbote Nueva	S.E. Carabayllo
2013	Avenida	Max Demanda	1.041	1.029
		Minima Demanda	1.063	1.051
	Estiaje	Max Demanda	1.028	1.011
		Minima Demanda	1.043	1.020
2016	Avenida	Max Demanda	1.036	0.995
		Minima Demanda	1.098	1.028
	Estiaje	Max Demanda	1.043	1.002
		Minima Demanda	1.088	1.030

Tabla N° 4.12 Niveles de Tensión en las barras de Carabayllo y Chimbote Nueva con reactor de barra en S.E. Chimbote Nueva

			Con reactor de barra	
			S.E. Chimbote Nueva	S.E. Carabayllo
2013	Avenida	Max Demanda	1.008	1.020
		Minima Demanda	1.020	1.037
	Estiaje	Max Demanda	0.996	1.003
		Minima Demanda	1.005	1.008
2016	Avenida	Max Demanda	1.008	0.987
		Minima Demanda	1.056	1.018
	Estiaje	Max Demanda	1.012	0.995
		Minima Demanda	1.051	1.022

El reactor de barra R_{20} de la S.E. Carabayllo permitira regular el nivel de tension de la S.E. Chimbote Nueva y Subestaciones Adyacentes. Se puede observar en las Tabla N° 4.11 y Tabla N° 4.12, la S.E. Carabayllo mejora sus niveles de tension para los diferentes escenarios analizados.

4.5 Efectos de la Compensación Shunt sobre la Impedancia Característica, Constante de Fase y Potencia Natural

Considerando una línea sin perdidas, se tiene que inicialmente una línea de transmisión L-5006 sin compensación, entonces:

$$Z_c = \sqrt{\frac{x_L}{b_c}} = \sqrt{\frac{0.317}{5.21035 \times 10^{-6}}} \approx 247 \text{ ohms}$$

$$\beta = \sqrt{x_L b_c} = \sqrt{(0.317)(5.21035 \times 10^{-6})} \approx 0.00128 \text{ rad/km}$$

$$P_0 = \frac{V^2}{Z_c} = \frac{(500)^2}{247} \approx 1012 \text{ MW}$$

De acuerdo a los resultados obtenidos, se tiene para la línea de transmisión L-5006 una compensación total de 360 MVAR (120 MVAR en la S.E. Carabayllo 500 kV y 240 MVAR en la S.E. Chimbote Nueva 500 kV). De (2.31) y (2.32) se tiene lo siguiente:

$$Z'_c = \frac{Z_c}{\sqrt{1-k_{sh}}}$$

$$\beta' = \beta\sqrt{1-k_{sh}}$$

$$P_0^l = P_0\sqrt{1-k_{sh}}$$

Reemplazando los parámetros de línea, y recordando que:

$$k_{sh} = \frac{b_{sh}}{b_c} = \frac{3.80952\mu S / km}{5.21085\mu S / km} = 0.731$$

$$Z'_c = \frac{247}{\sqrt{1-0.731}}$$

$$Z'_c = 476.30\Omega$$

$$\beta' = 0.00129\sqrt{1-0.731}$$

$$\beta' = 0.00066897\text{rad} / km$$

$$P_0^l = 1012\sqrt{1-0.731}$$

$$P_0^l = 524.80\text{MW}$$

De los resultados obtenidos, la impedancia característica aumento, lo cual produce una disminución en la potencia natural de la línea L-5006.

En las Fig. 4.20, Fig. 4.21 y Fig. 4.22 se muestran el efecto de la compensación shunt inductiva sobre la impedancia característica, potencia natural y constante de fase de la línea L-5006.

4.6 Característica Potencia – Angulo de la línea L-5006 con compensación

Siguiendo con la consideración de una línea sin pérdidas y con tensiones de envío y recepción mantenidas constantes e iguales a 1.0 p.u, se tienen los siguientes resultados:

Línea no compensada:

$$\theta = \beta l$$

$$\theta = 0.00129(378) = 0.48765\text{rad}$$

$$\theta = 27.94^\circ$$

Entonces:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{\text{sen}\theta} \text{sen}\delta = 2.134\text{sen}\delta \quad (4.1)$$

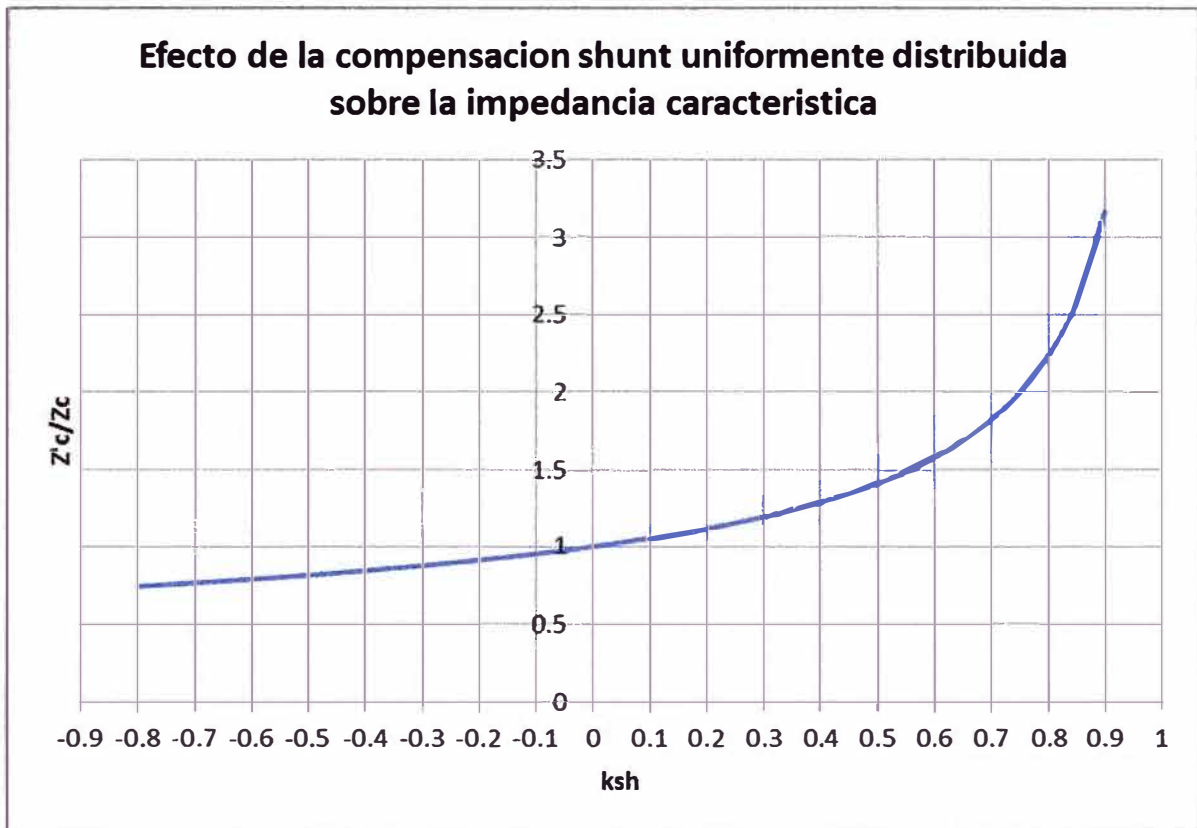


Fig. 4.20 Efecto de la compensación Shunt uniformemente distribuida sobre la impedancia característica

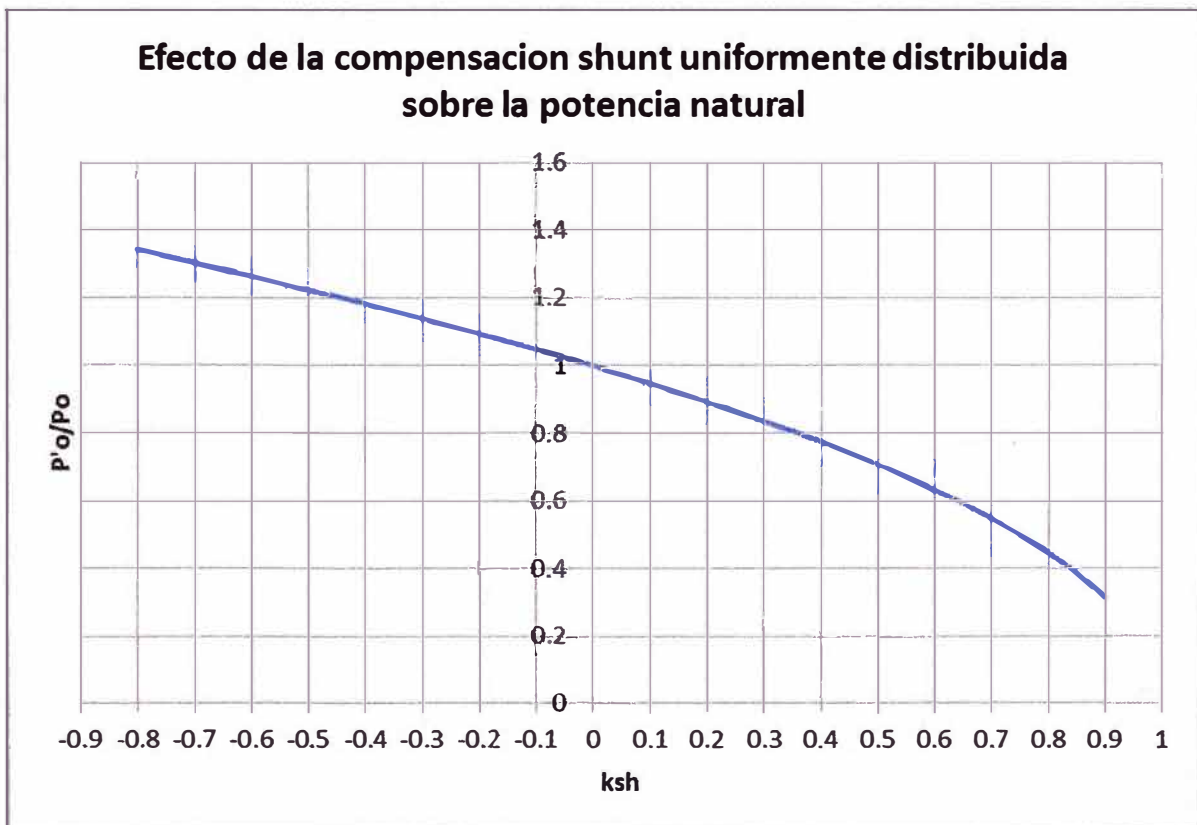


Fig. 4.21 Efecto de la compensación Shunt uniformemente distribuida sobre la potencia natural

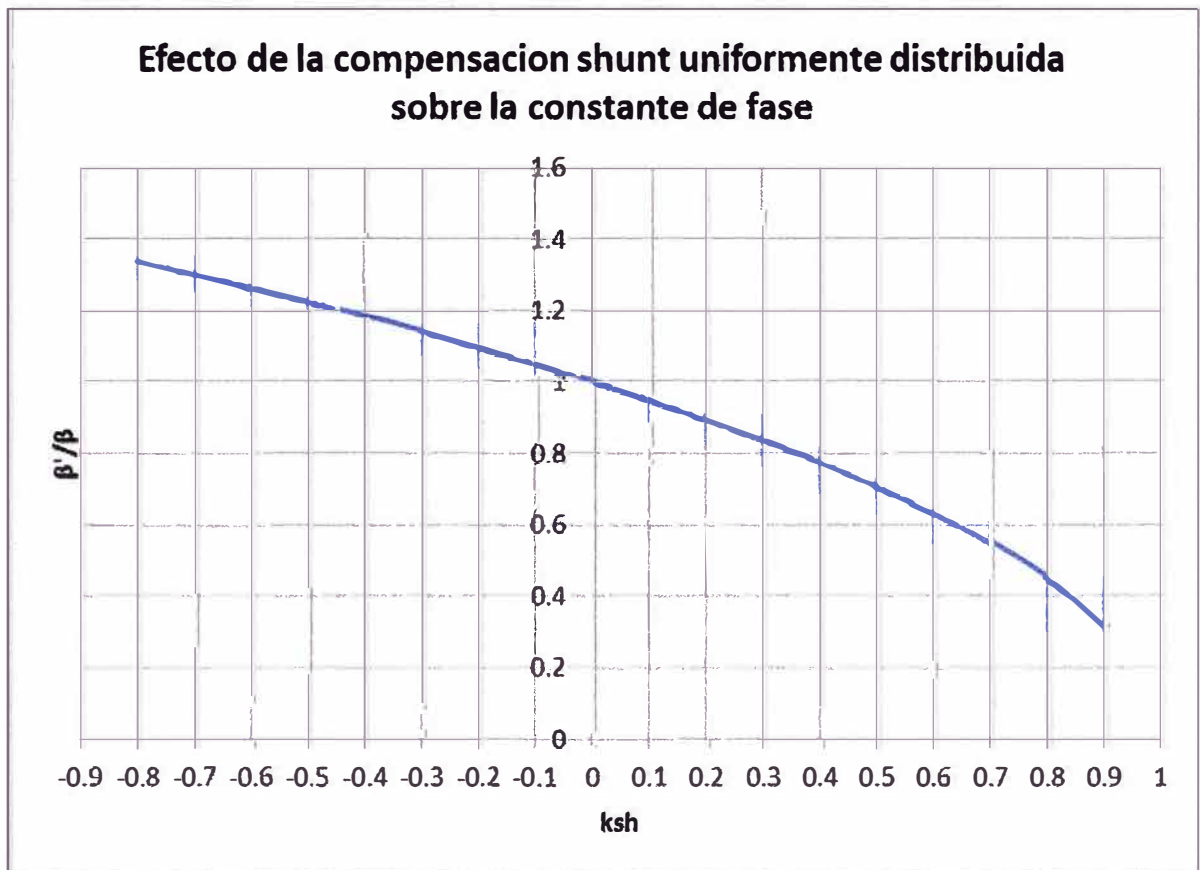


Fig. 4.22 Efecto de la compensación Shunt uniformemente distribuida sobre la constante de fase

Línea compensada:

$$\theta' = \beta' l$$

$$\theta' = 0.00066897(378) = 0.25287 \text{ rad}$$

$$\theta' = 14.49^\circ$$

Entonces:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{\sqrt{1-k_{sh}}}{\text{sen}\theta'} \text{sen}\delta = 2.0738 \text{sen}\delta \quad (4.2)$$

En la Fig. 4.24 se muestra la característica potencia ángulo de la línea L-5006 sin compensación y compensada. De acuerdo a la gráfica el efecto de colocar compensación shunt inductiva no modifica la característica potencia-ángulo de línea.

4.7 Máxima Potencia de Transferencia

La Fig. 4.23 muestra que hay un límite para la potencia que puede ser transmitida a través de la línea de transmisión hacia la barra de recepción para magnitudes específicas de tensión de envío V_S y tensión de recepción V_R . Es notar que el punto K se mueve a lo largo del arco hasta donde el ángulo $\delta = \beta$, mayor potencia es entregada. Así como δ incrementa, menor potencia es recibida. Por lo tanto, la potencia máxima es:

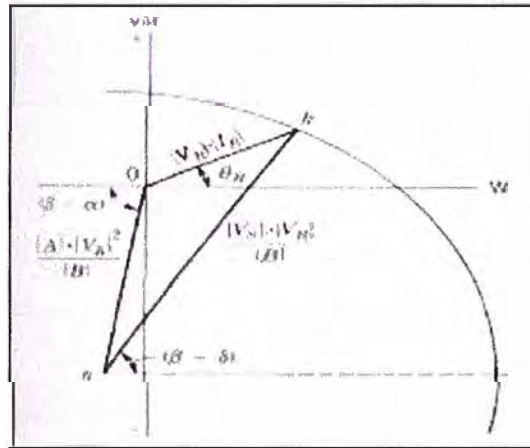


Fig. 4.23 Limite de Potencia Transmitida

$$P_{Rcrit} = \frac{|V_R||V_S|}{|B|} \cos(\beta - \delta_{crit}) - \frac{|A||V_R|^2}{|B|} \cos(\beta - \alpha) \quad (4.3)$$

Donde:

$$A = |A| \angle \alpha$$

$$B = |B| \angle \beta$$

$$V_R = |V_R| \angle 0^\circ$$

$$V_S = |V_S| \angle \delta^\circ$$

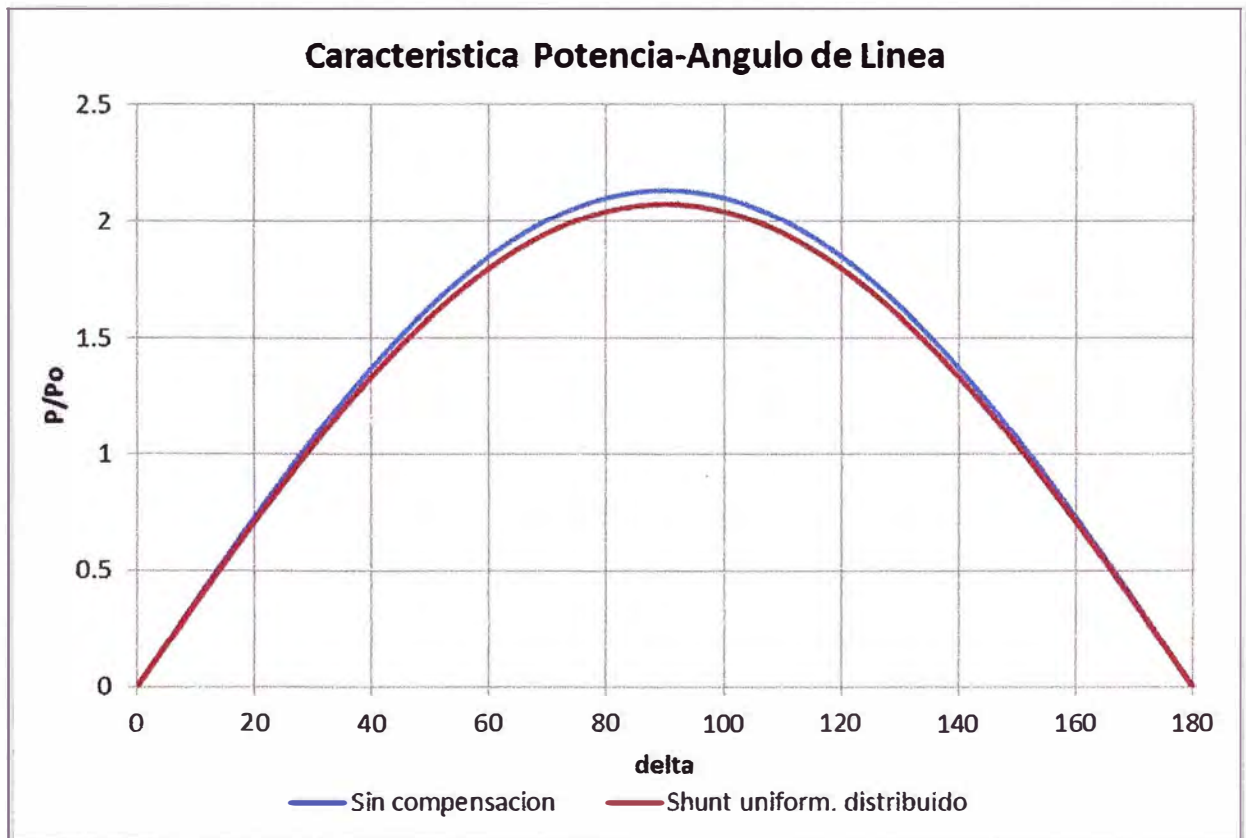


Fig. 4.24 Característica Potencia vs. Ángulo de Línea de Transmisión

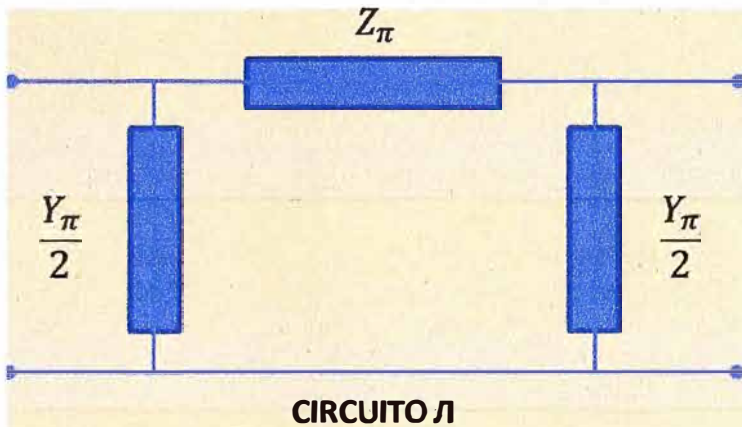
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Las líneas de transmisión en 500 kV (Muy Alta Tensión) de longitud larga ($L \geq 250$ km), aportan potencia reactiva capacitiva al sistema, siendo necesario la instalación de un sistema de compensación reactiva inductiva.
2. En la energización de las líneas de transmisión de 500 kV, ocurre el efecto Ferranti, el cual consiste en elevar la tensión en el tramo abierto de la línea a energizar. En líneas de longitud larga esta tensión es mayor a 1.08 p.u. En la práctica esta tensión es aún mayor por lo tanto la compensación shunt inductiva es requerida para mitigar este efecto al momento de la energización.
3. La compensación shunt inductiva es también usada para condiciones de carga baja, en las cuales se producen más reactivos capacitivos de los que el sistema pueda absorber sin riesgo de inestabilidad o tensiones excesivamente altas en los terminales de líneas.
4. El Reactor R-20, instalado directamente a la barra de la S.E. Chimbote Nueva, permite mejorar el nivel de tensiones de las barras adyacentes (S.E. Carabayllo y S.E. Trujillo Nueva), sobretodo en casos de mínima demanda.
5. Para el Reactor R-17 (Reactor de línea en la S.E. Carabayllo 500 kV), se toma el valor mínimo ($Q = 120\text{MVar}$) para el cual las tensiones de barras están dentro del margen aceptable $\langle 0.95 - 1.05 \rangle$ pu.
6. La instalación de reactores inductivos en la línea L-5006, modifica levemente la curva característica Potencia Activa – Angulo de la línea. La compensación shunt aumenta la impedancia característica (Z_C) y disminuye la potencia natural de la línea.
7. Se recomienda en líneas largas ($l \geq 500$ km), para un adecuado control de la tensión en la barras de tensión de envío y recepción, la construcción de una subestación intermedia, y en la cual se pueden adicionar reactores, los cuales se conectarán en periodos de baja demanda y se desconectarán en periodos de alta demanda.

ANEXOS

ANEXO A - Representación de líneas de transmisión mediante cuadripolos

CONSTANTES DE TRANSMISION

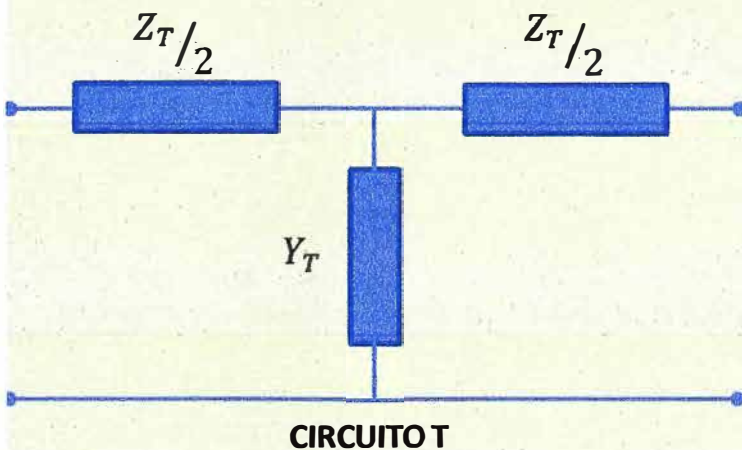


$$A = D = 1 + \frac{Z_{\pi} Y_{\pi}}{2}$$

$$B = Z_{\pi}$$

$$C = Y_{\pi} \left(1 + \frac{Z_{\pi} Y_{\pi}}{4} \right)$$

CIRCUITO L



$$A = D = 1 + \frac{Z_T Y_T}{2}$$

$$B = Z_T \left(1 + \frac{Z_T Y_T}{4} \right)$$

$$C = Y_T$$

CIRCUITO T

Linea	A = D	B	C	CIRCUITO
Corta	1	Z	0	
Media	$1 + \frac{ZY}{2}$	Z	$Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right)$	
Larga	$\cosh \gamma l$ $1 + \frac{Z_{\pi} Y_{\pi}}{2}$	$Z_C \sinh \gamma l$ Z_{π}	$\frac{1}{Z_C} \sinh \gamma l$ $Y_{\pi} \left(1 + \frac{Z_{\pi} Y_{\pi}}{4} \right)$	
Larga sin pérdidas	$\cos \beta l$	$j Z_C \sin \beta l$	$j \frac{1}{Z_C} \sin \beta l$	

$$Z_{\pi} = Z_C \sinh \gamma l = Z_C \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l}$$

$$\frac{Y_{\pi}}{2} = \frac{1}{Z_C} \sinh \gamma l = \frac{Y \tanh \gamma l / 2}{\gamma l / 2}$$

Anexo B – Ficha Técnica del Proyecto L.T. Carabaylo – Chimbote 500 kV

FICHA DE PROYECTOS No LI1-A
PROYECTOS DE TRANSMISION DE CORRIENTE ALTERNA

Fecha: 04/09/2012

1.0 ASPECTOS GENERALES

1.1 Nombre o denominación de la línea de transmisión

LÍNEA de TRANSMISION CARABAYLLO – CHIMBOTE A 500 KV, CHIMBOTE NUEVA - TRUJILLO NUEVA A 500 KV Y TRUJILLO NUEVA - TRUJILLO NORTE A 220 KV DOBLE CIRCUITO

1.2 Fecha de puesta en servicio

18/12/2012

(indicar el año y mes: mes/año)

1.3 Subestaciones que conecta

Inicio
Carabayllo

Fin
Chimbote Nueva

1.4 Empresa propietaria

CONSORCIO TRANSMANTARO SAC

2.0 CARACTERISTICAS FISICAS Y ELECTRICAS

2.1	Nivel de tensión (kV):	500
2.2	Capacidad de Corriente en condiciones normales (A)	1150
2.3	Capacidad de Corriente en condiciones de emergencia (A)	1501
2.4	Tiempo de sobrecarga (horas)	0.5
2.5	Numero de temas:	1
2.6	Longitud total (km):	376
2.7	Configuración geométrica típica (Adjuntar planos):	Horizontal
2.8	Longitud de vano promedio (m):	523
2.9	Tipo y material de estructuras de soporte:	Acero Extragalvanizado
2.10	Ruta geográfica (Adjuntar planos):	
2.11	Perfil longitudinal (Adjuntar planos):	

Tramo	Tipo	Longitud	Material del Conductor	Sección del Conductor	Conductor por Fase	Capacidad Total	Cables de Guarda	Resistencia Cable de Guarda
#	Aéreo o Subterráneo	(km)	Tipo	(mm ²)	#	(A)	#	ohm/km
1	Aéreo	376	ACAR	405.0000	4	1150	1	0.296
2								
3								
...								

Tramo	R	X	B	G	R0	X0	B0	G0
#	ohm/km	ohm/km	mS/km	mS/km	ohm/km	ohm/km	mS/km	mS/km
1	0.020	0.425	5.176	0.000	0.168	1.082	2.705	0.000
2								
3								
...								

3.0 SISTEMA DE PROTECCION:

3.1 Descripción del sistema de protección principal:

Protección de distancia (21), con funciones de respaldo 67N en comparación direccional, funciones de sobretensión, etc., de acuerdo con la recomendado por el COES para protecciones de líneas de transmisión largas.
 Funciones habilitadas: 21, POTT, 67NCD, 67N, STUB, 68, 27, 59, SOTF

3.2 Descripción del sistema de protección secundario:

Protección de distancia (21), con funciones de respaldo 67N en comparación direccional, funciones de sobretensión, etc., de acuerdo con la recomendado por el COES para protecciones de líneas de transmisión largas.
 Funciones habilitadas: 21, POTT, 67NCD, 67N, STUB, 68, 27, 59, SOTF

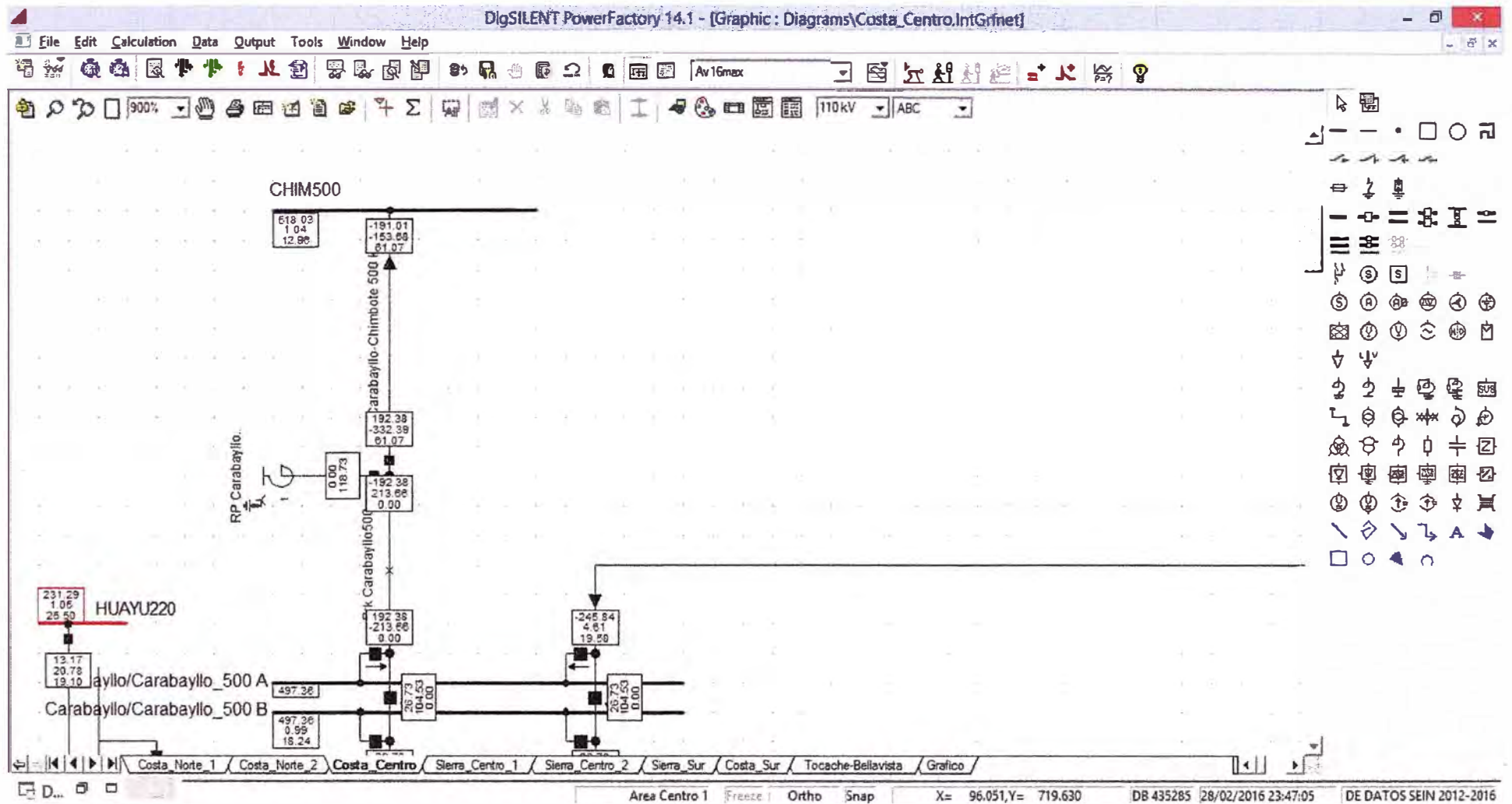
3.3 Descripción del sistema de protección de respaldo:

Protección 67N de sobrecorriente direccional de tierra temporizada.
 Funciones habilitadas: 51,50,51N,50N,67

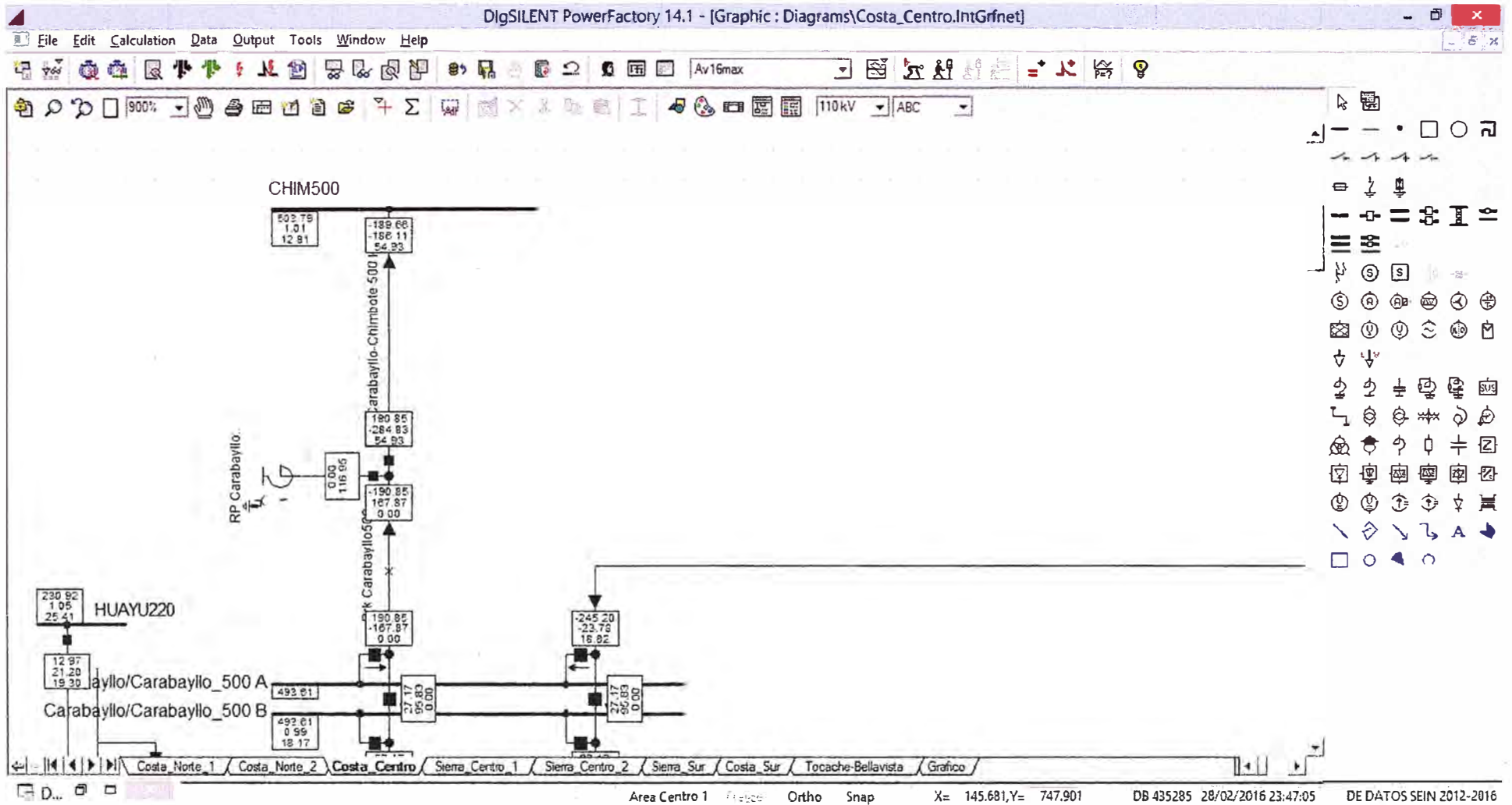
Anexo C – Esquemas unifilares de las subestaciones Carabaylo y Trujillo Nueva

Anexo D. SIMULACIONES EN DIgSILENT, Año 2016

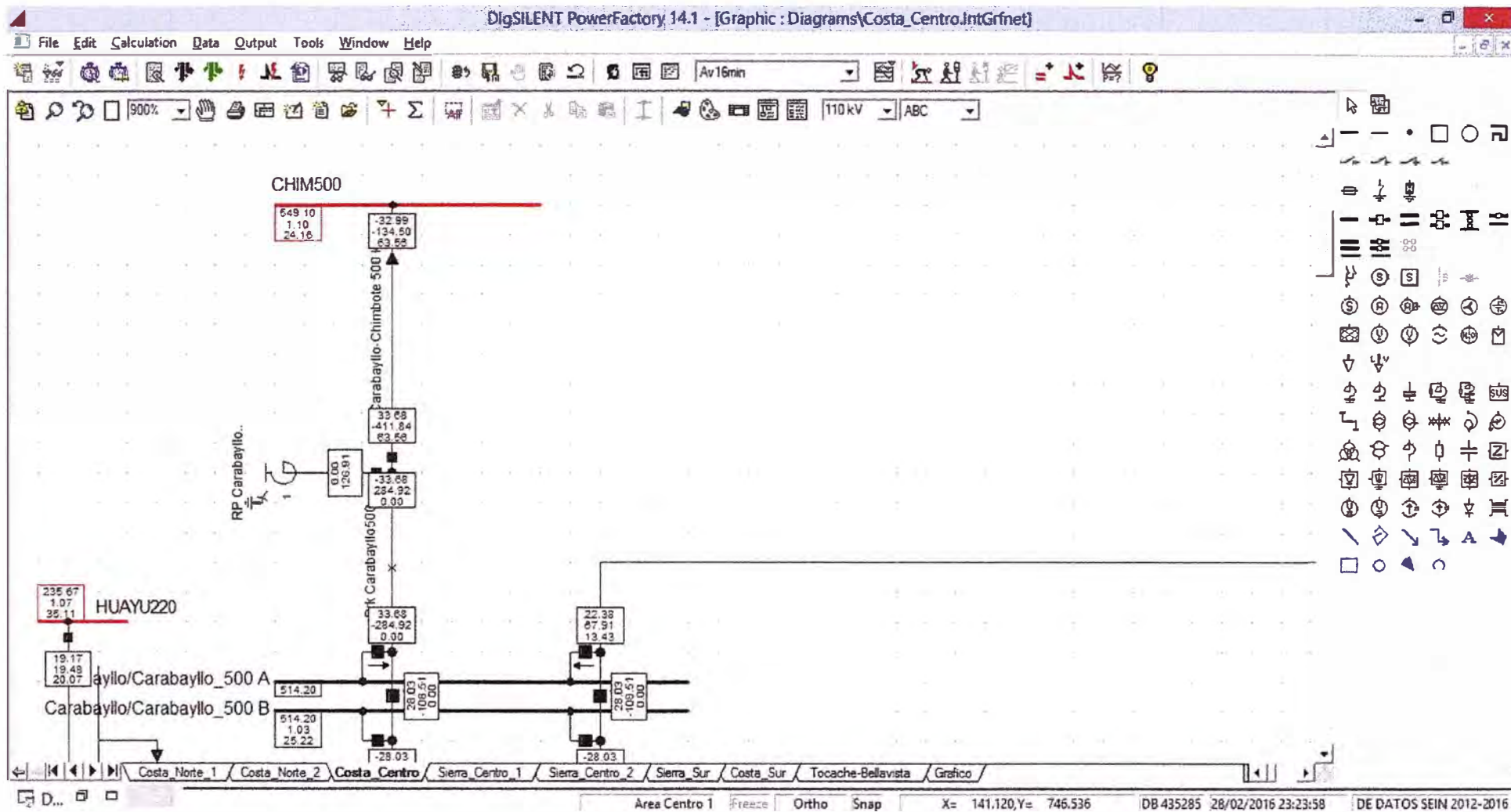
Simulación 2016 avenida en máxima demanda sin R₂₀



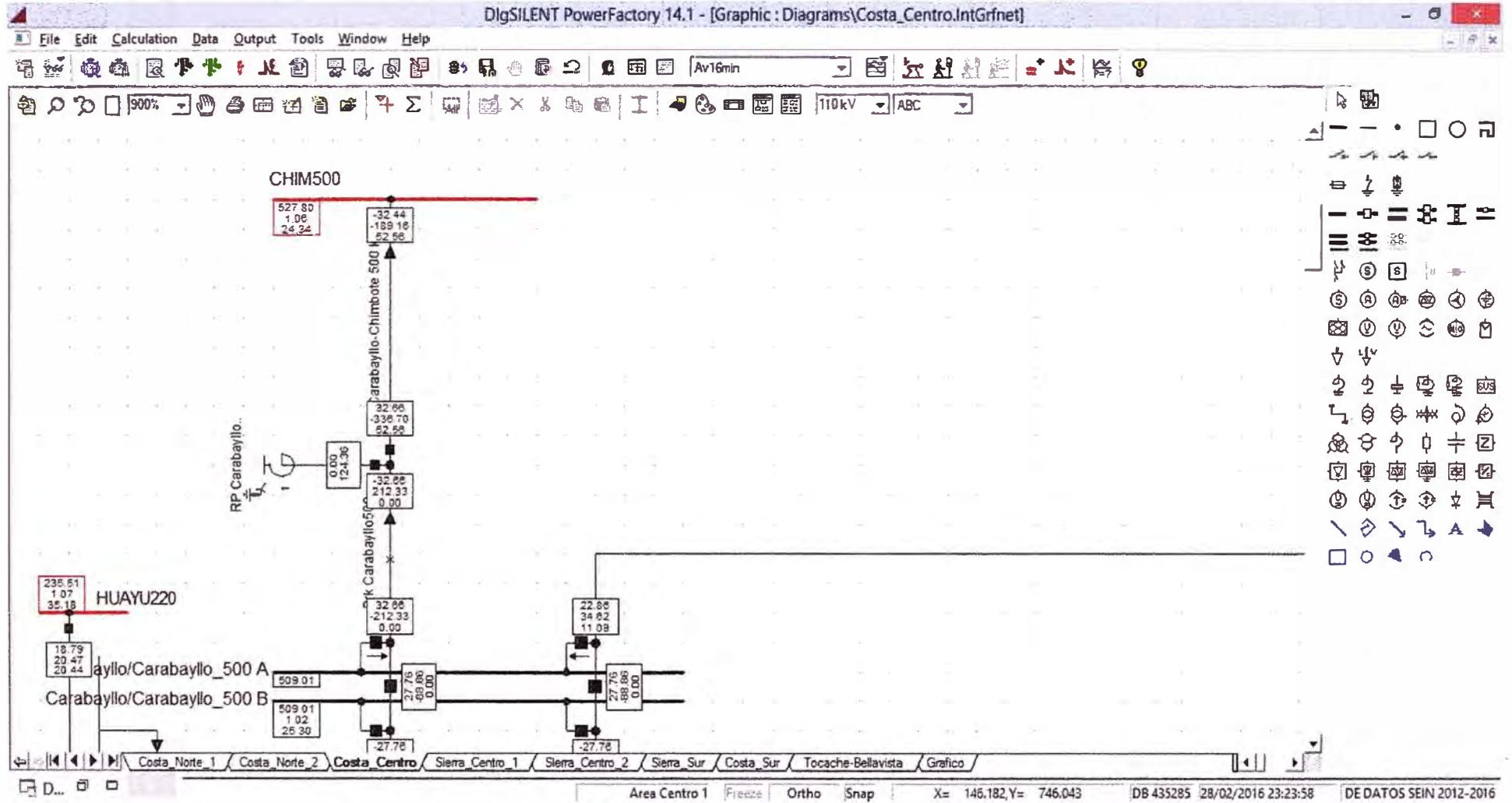
Simulación 2016 avenida en máxima demanda con R₂₀



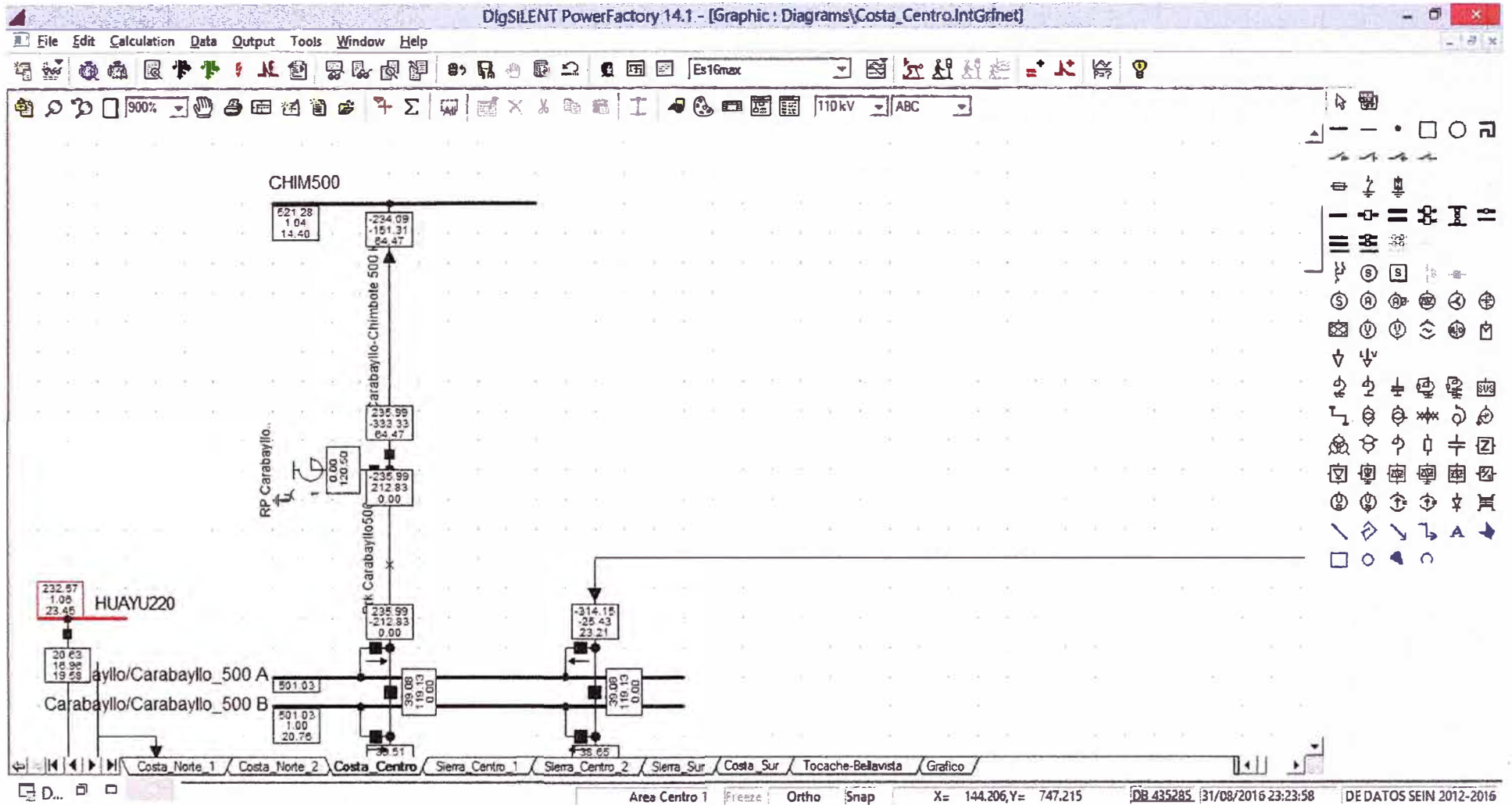
Simulación 2016 avenida en mínima demanda sin R-20



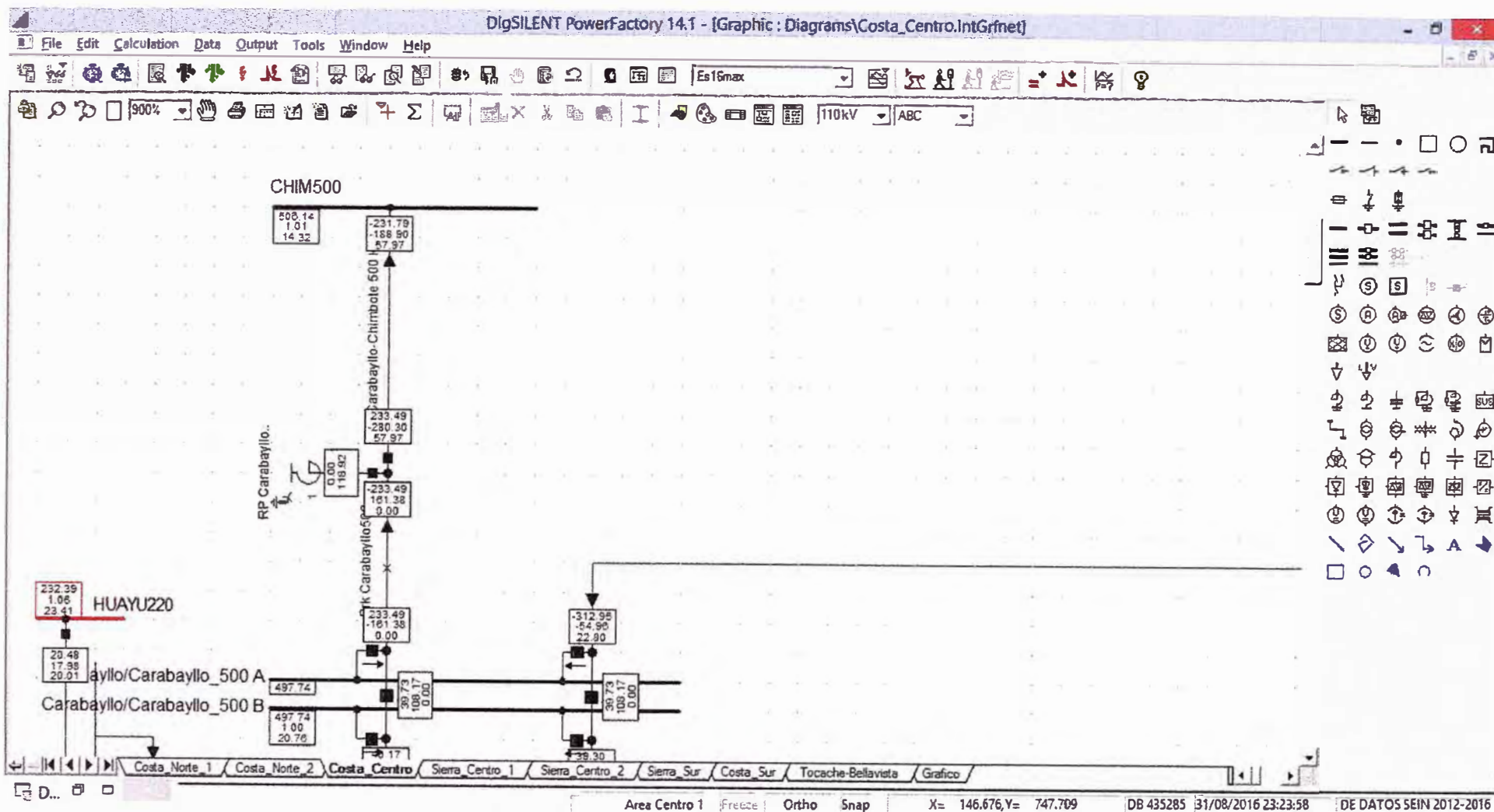
Simulación 2016 avenida en mínima demanda con R-20



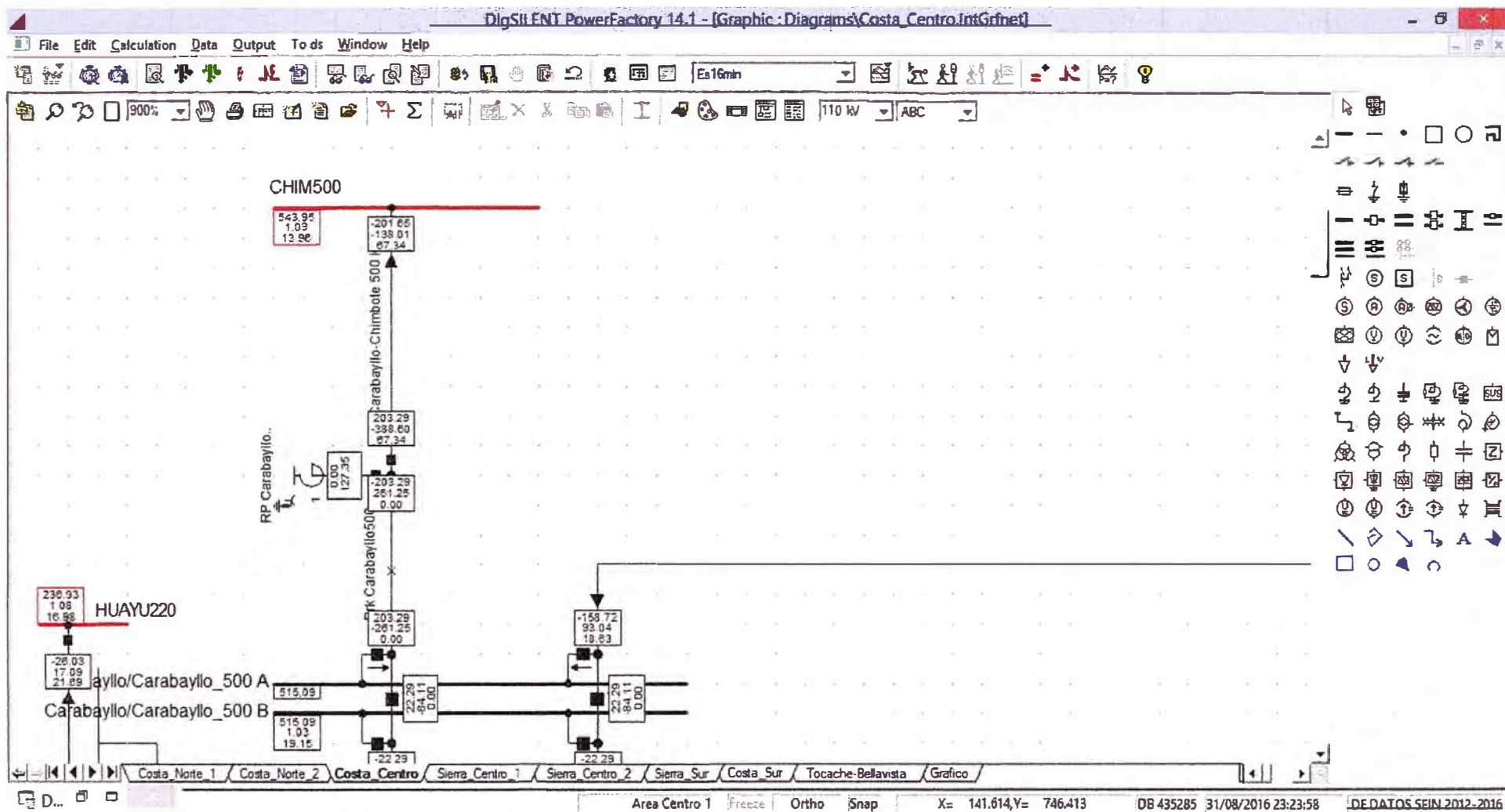
Simulación 2016 estiaje en máxima demanda sin R₂₀



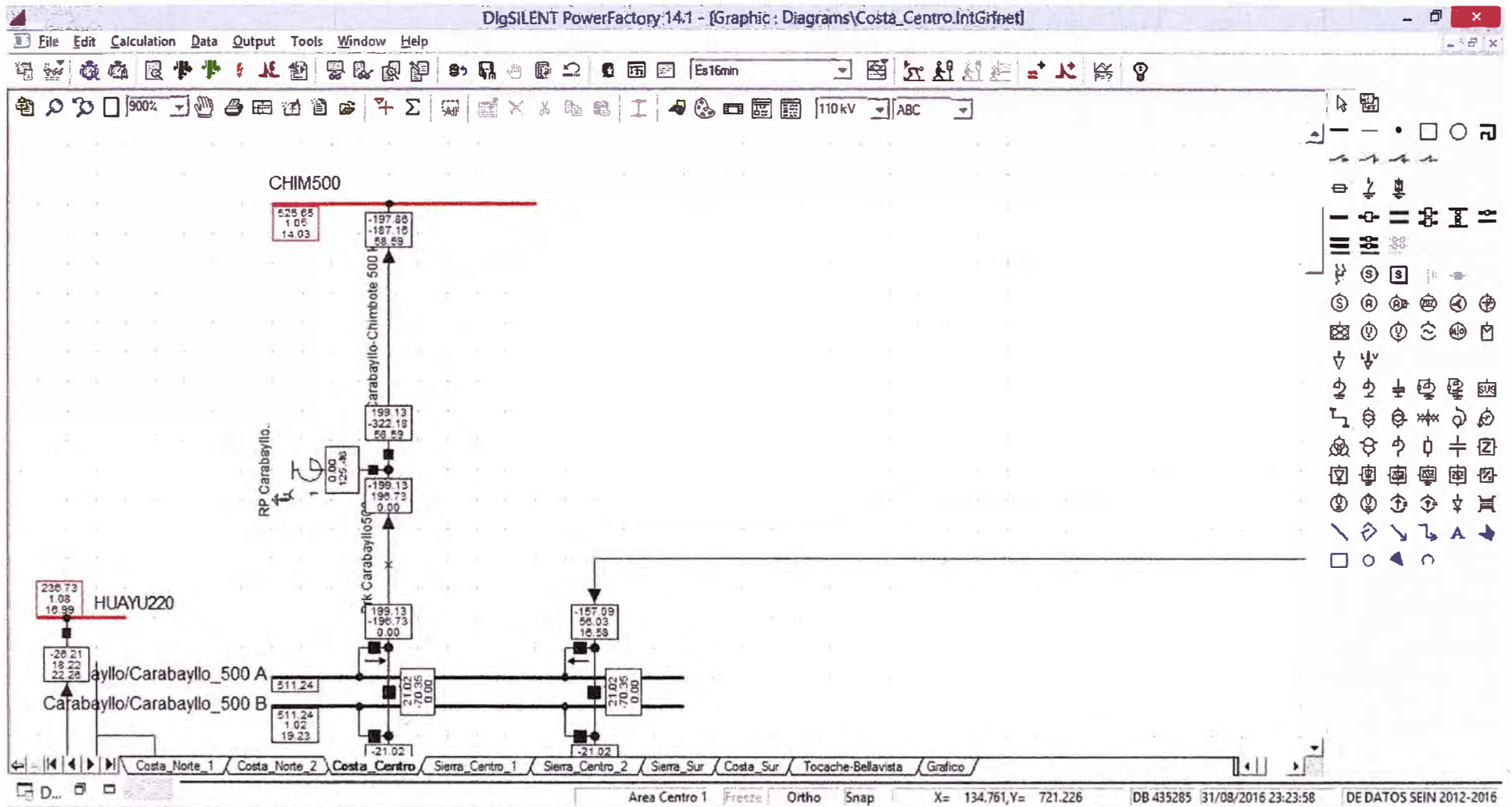
Simulación 2016 estiaje en máxima demanda con R₂₀



Simulación 2016 estiaje en mínima demanda sin R₂₀

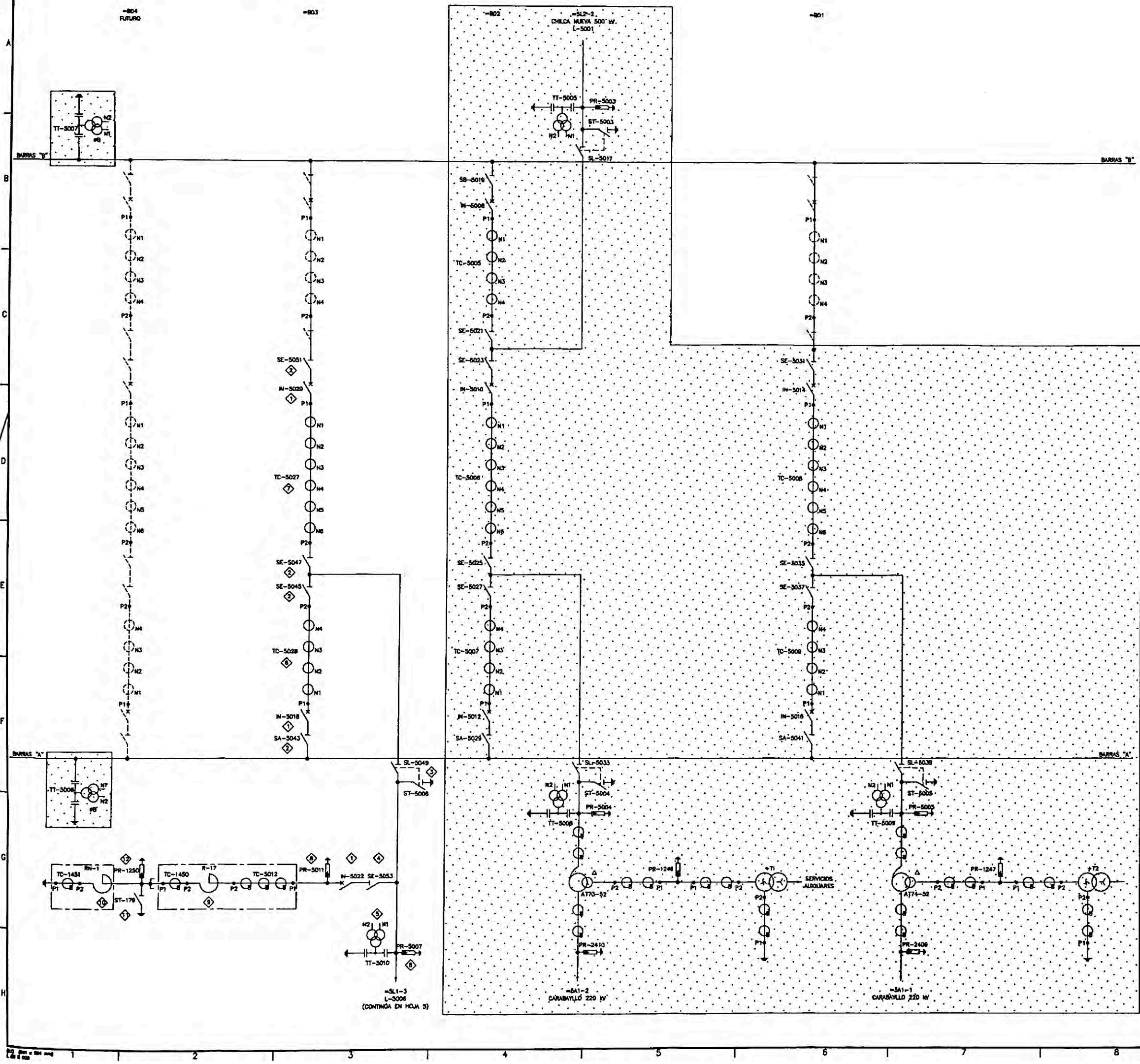


Simulación 2016 estiaje en mínima demanda con R₂₀



BIBLIOGRAFIA

- [1] Prabha Kundur, "Power System Stability and Control", Mc. Graw Hill, 1994
- [2] Salvador Acha Daza, "Diseño de Líneas de Transmisión", NiAT, Mayo 2012
- [3] E. Acha, Power Electronic Control in Electrical Systems, Newnes, 2002
- [4] Carlos Felipe Ramírez, "Subestaciones de Alta y Extra Alta Tension", Mejia Villegas S.A., 2003
- [5] Roberto Ramírez Arcelles, "Compensación Reactiva en Sistemas de Transmisión", Apuntes de clase FIEE UNI, 2005
- [6] Julio Barquin, "La Regulación Tensión-Reactiva", Apuntes de clase Control de Sistemas de Energía Electrica IIT



DESCRIPCIÓN EQUIPOS ALTA TENSION

ITEM	DESCRIPCIÓN
1	INTERRUPTOR TRIPOLAR SFB, 550 kV, 3150 A, 40 kA, 1550/1175/880 kV. MANDO MONOPOLAR.
2	SECCIONADOR TIPO SEMIPANTOGRAFO TRIPOLAR, 550 kV, 2000 A, 40 kA, 1550/1175/880 kV.
3	SECCIONADOR TIPO SEMIPANTOGRAFO TRIPOLAR CON CUCHILLA DE PUESTA A TIERRA, 550 kV, 2000 A, 40 kA, 1550/1175/880 kV.
4	SECCIONADOR TRIPOLAR DOBLE APERTURA, 550 kV, 2000 A, 40 kA, 1550/1175/880 kV.
5	TRANSFORMADOR DE TENSION CAPACITIVO CON 2 DEVANADOS SECUNDARIOS, 500 kV/110 kV, 3P, 0.2, 5 VA, 1550/880 kV.
6	TRANSFORMADOR DE CORRIENTE CON 4 NUCLEOS SECUNDARIOS: 1 DE MEDIDA (2000-1000/1, 0.2, 5 VA) Y 3 DE PROTECCION (2000-1000/1, 5P20, 10 VA) 40 kA, 1550/880 kV.
7	TRANSFORMADOR DE CORRIENTE CON 6 NUCLEOS SECUNDARIOS: 2 DE MEDIDA (2000-1000-1, 0.2, 5 VA) Y 4 DE PROTECCION (2000-1000/1, 5P20, 10 VA) 40 kA, 1550/880 kV.
8	DESCARGADOR DE SOBRETENSION 444 kV, 355 kV, 20 kA, CLASE 5.
9	BANCO DE REACTORES 3x40 mvar + 1x40 mvar 500 kV/3 kV, 1550-880/1175/880-230 kV CON TRANSFORMADORES DE CORRIENTE TIPO BUJE, NUCLEOS DE MEDIDA 1000/500 A, 0.2, 5 VA, PROTECCION 5P20, 10 VA.
10	REACTOR DE NEUTRO 800 pFm, 123 kV, 500-125/230-50 kV CON TRANSFORMADOR DE CORRIENTE TIPO BUJE, NUCLEO DE PROTECCION 5P20, 10 VA.
11	CUCHILLA RAPIDA DE PUESTA A TIERRA 123 kV, 40 kA, 850/230 kV.
12	DESCARGADOR DE SOBRETENSION DE BANCO DE REACTORES 120 kV, 78 kV, 20 kA, CLASE 4.

- CONVENCIONES:
- EQUIPO A SUMINISTRAR
 - - - FUTURO
 - ◻ EXISTENTE

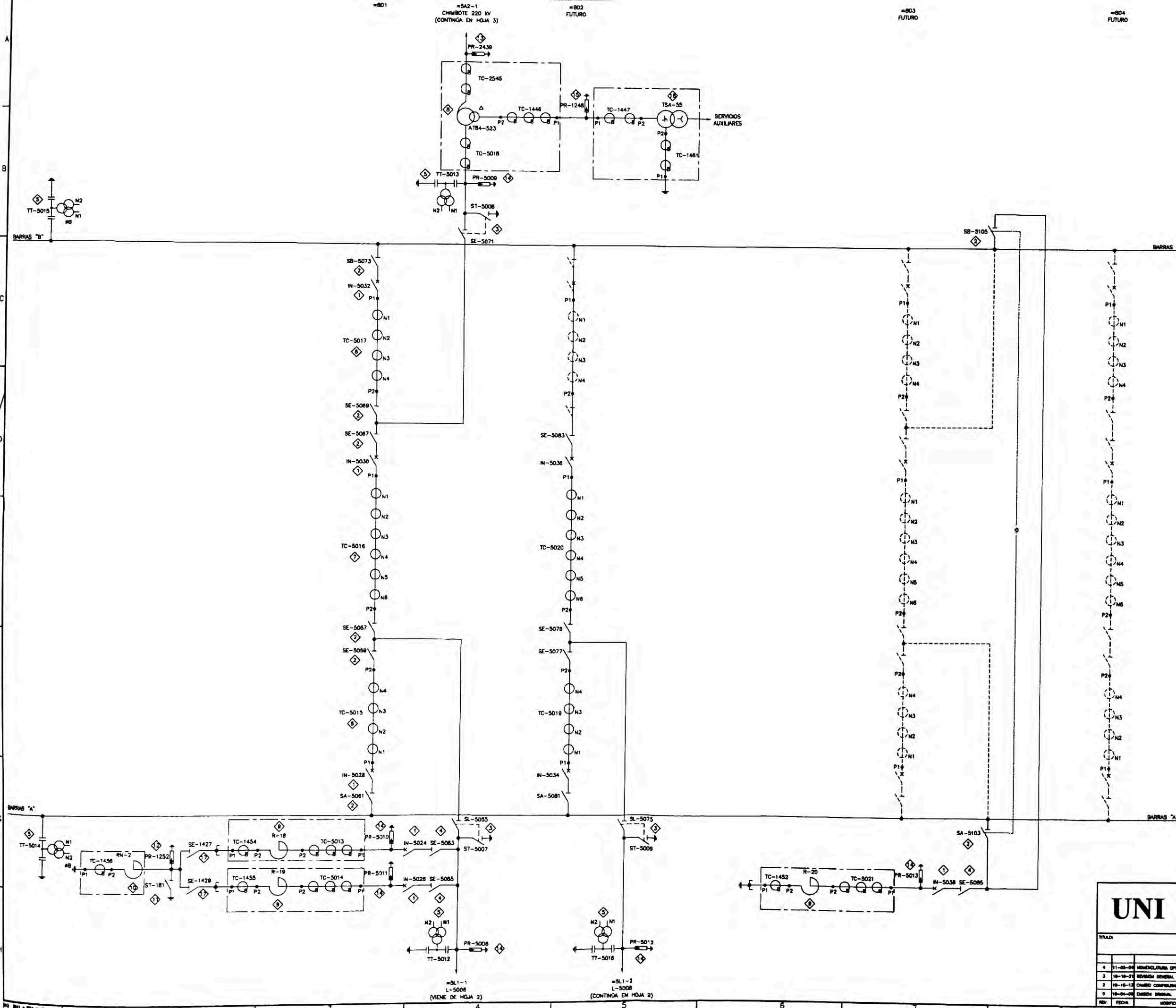
UNI

PROYECTO ZAPALLAL - TRUJILLO
500 kV/220 kV

DIAGRAMA UNIFILAR GENERAL
SUBESTACION CARABAYLLO 500 kV

NO.	FECHA	MODIFICACION	APROBADO	CONTRATISTA	PROYECTO	NO. DE PLAN	TOTAL DE PLANES
1	11-05-04	MODIFICACION OPERATIVA	A.J.M.	CONTRATISTA	PROYECTO	1	2
2	10-04-08	MODIFICACION OPERATIVA	A.J.M.	CONTRATISTA	PROYECTO	2	2
3	10-04-08	MODIFICACION OPERATIVA	A.J.M.	CONTRATISTA	PROYECTO	3	2

20 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000



DESCRIPCIÓN EQUIPOS ALTA TENSION

ITEM	DESCRIPCIÓN
1	INTERRUPTOR TRIPOLAR SF6, 550 kV, 3150 A, 40 kA, 1550/1175/680 kV. MANDO MONOPOLAR
2	SECCIONADOR TIPO SEMPAINTÓGRAFO TRIPOLAR, 550 kV, 2000 A, 40 kA, 1550/1175/680 kV
3	SECCIONADOR TIPO SEMPAINTÓGRAFO TRIPOLAR CON CUCHILLA DE PUESTA A TIERRA 550 kV, 2000 A, 40 kA, 1550/1175/680 kV
4	SECCIONADOR TRIPOLAR DOBLE APERTURA, 550 kV, 2000 A, 40 kA, 1550/1175/680 kV.
5	TRANSFORMADOR DE TENSION CAPACITIVO CON 2 DEVANADOS SECUNDARIOS. 500/√3 kV-110/√3 V, SP, 0,2, 5 VA, 1550/680 kV
6	TRANSFORMADOR DE CORRIENTE CON 4 NUCLEOS SECUNDARIOS: 1 DE MEDIDA (2000-1000/1, 0,2, 5 VA) Y 3 DE PROTECCION (2000-1000/1, 5P20, 10 VA) 40 kA, 1550/680 kV
7	TRANSFORMADOR DE CORRIENTE CON 6 NUCLEOS SECUNDARIOS: 2 DE MEDIDA (3000-1000-1, 0,2, 5 VA) Y 4 DE PROTECCION (2000-1000/1, 5P20, 10 VA) 40 kA, 1550/680 kV
8	BANCO DE AUTOTRANSFORMADORES 3x250 MVA + 1x250 MVA, 500/220 kV, 1550-1050/1175/680-480 kV CON TRANSFORMADORES DE CORRIENTE TIPO BLUJE, NUCLEO DE MEDIDA 1000/500 A, 0,2, 5 VA, PROTECCION 5P20, 10 VA EN EL LADO DE ALTA Y NUCLEO DE MEDIDA 2500/1250 A, 0,2, 5 VA Y PROTECCION 5P20, 15 VA EN EL LADO DE BAJA.
9	BANCO DE REACTORES 3x40 MVAR + 1x40 MVAR 500/√3 kV, 1550-550/1175/680-230 kV CON TRANSFORMADORES DE CORRIENTE TIPO BLUJE, NUCLEO DE MEDIDA 1000/500 A, 0,2, 5 VA, PROTECCION 5P20, 10 VA
10	REACTOR DE NEUTRO 800 ohm, 123 kV, 550-125/230-50 kV CON TRANSFORMADOR DE CORRIENTE TIPO BLUJE, NUCLEO DE PROTECCION 5P20, 10 VA
11	CUCHILLA RÁPIDA DE PUESTA A TIERRA 123 kV, 40 kA, 550/230 kV.
12	DESCARGADOR DE SOBRETENSION DE BANCO DE REACTORES 120 kV, 78 kV, 20 kA, CLASE 4.
13	DESCARGADOR DE SOBRETENSION 198 kV, 158 kV, 20 kA, CLASE 4.
14	DESCARGADOR DE SOBRETENSION 444 kV, 365 kV, 20 kA, CLASE 5.
15	DESCARGADOR DE SOBRETENSION 48 kV, 38 kV, 20 kA, CLASE 4.
16	TRANSFORMADOR ZIG ZAG DE PUESTA A TIERRA 750 kVA, 100 ohm/75SE 38 kV, 200/85 kV EN LADO DE ALTA Y 1,2 kV, 30 kV EN LADO DE BAJA CON TRANSFORMADORES DE CORRIENTE TIPO BLUJE NUCLEO DE PROTECCION 5P30, 30 VA.
17	SECCIONADOR MONOPOLAR 123 kV, 550/230 kV, 40 kA.

- CONVENCIONES:
- EQUIPO A SUMINISTRAR
 - - - FUTURO
 - * - ENCLAVAMIENTO ELECTRICO

UNI

PLANO Nº: PE-ZATR-DISE-K063.001

PROYECTO ZAPALLAL - TRUJILLO

500 kV/220 kV

TITULO: DIAGRAMA UNIFILAR GENERAL SUBSTACION CHIMBOTE 500 kV

Nº	FECHA	MODIFICACION	ELABORADO	REVISADO	ASPECTO TECNICO
1	11-05-04	REVISION GENERAL OPERATIVA	A.J.M.	J.P.L.	PROYECTO
2	16-10-04	REVISION GENERAL	A.J.M.	J.P.L.	PROYECTO
3	16-10-04	CHIMBO CONFIRMACION CHIMBOTE	A.J.M.	J.P.L.	PROYECTO
4	16-04-06	DISEÑO DEFINITIVO	A.J.M.	J.P.L.	PROYECTO
5	16-04-06	DISEÑO DEFINITIVO	A.J.M.	J.P.L.	PROYECTO

PE-ZATR-DISE-K063.001