

### 3. COMPENSACION SERIE EN LINEAS DE TRANSMISION

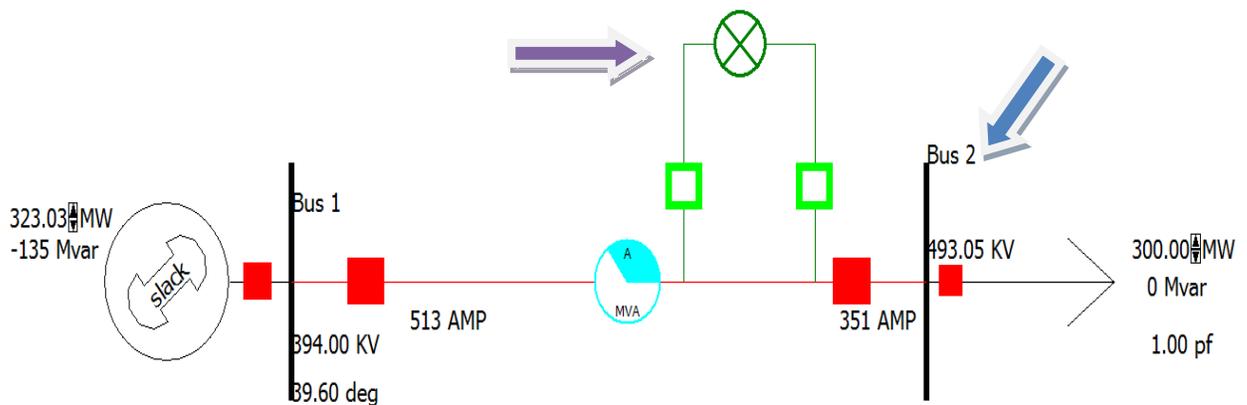
Los capacitores serie son aplicados para reducir la reactancia inductiva en las líneas de transmisión. Los beneficios de aplicar capacitores serie en una línea de transmisión incluye mejorar los márgenes de estabilidad, mucho mejor división de la carga en las vías en paralelo, habilidad de ajustar los niveles de carga de la línea, reducir las pérdidas de transmisión, y reducir la caída del voltaje en el sistema durante disturbios severos.

La aplicación de los capacitores serie es normalmente económica para líneas de longitud mayor a 200 millas. Sin embargo, estos pueden y tienen aplicaciones en líneas de longitud corta donde la línea es parte de una línea de transmisión larga (sistema). Típicamente, los capacitores serie son aplicados para compensar del 25% al 75% de la reactancia inductiva de la línea de transmisión.

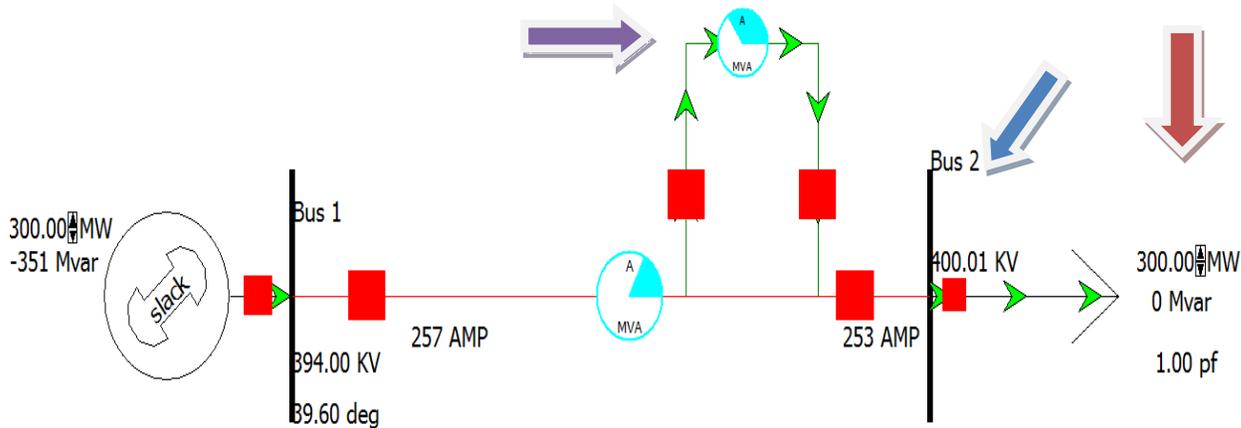
Los capacitores serie son expuestos a un amplio rango de corrientes como se ve en la figura 3.1 lo cual trae consigo voltajes largos a través de los capacitores. En general, el diseño de los capacitores que puedan resistir estos sobre voltajes no es muy económico, por lo tanto equipo adicional es usualmente aplicado para proteger al capacitor.

En las siguientes figuras se observa la simulación de una línea con capacitor serie y sin capacitor serie, se puede ver claramente como al entrar en operación el capacitor serie se corrige el voltaje y como se puede aumentar la potencia gracias al capacitor.

(a)



(b)



(c)

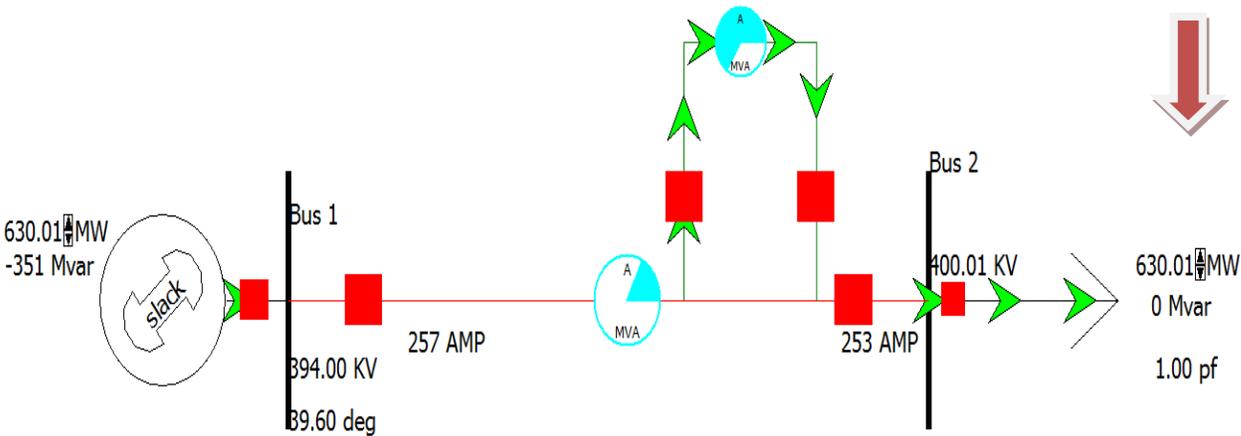


Figura 3.1. Simulación de la inserccion de un capacitor serie (a) Línea sin compensación, (b) Línea compensada, (c) Aumento de potencia gracias a la compensación

### 3.1 Situación actual de las líneas de transmisión existentes

La red de transmisión considera los niveles de tensión de 400, 230 y 161 kilovolts (kV). Al finalizar diciembre de 2009, esta red alcanzó una longitud de 49,250 km.

#### Longitud de líneas de transmisión (km)

Nivel de tensión (kV)	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010*
400	13,695	14,504	15,998	17,790	18,144	19,265	19,855	20,364	20,900	20,900
230	22,645	24,060	24,773	25,687	27,148	27,745	28,164	28,093	27,801	27,801
161	508	646	470	475	475	475	547	547	549	549
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>36,848</b>	<b>39,210</b>	<b>41,241</b>	<b>43,952</b>	<b>45,767</b>	<b>47,485</b>	<b>48,566</b>	<b>49,004</b>	<b>49,250</b>	<b>49,250</b>

La transformación es el proceso que permite, utilizando subestaciones eléctricas, cambiar las características de la electricidad (tensión y corriente) para facilitar su transmisión y distribución. Ésta ha crecido en paralelo al desarrollo de la red de transmisión y distribución, contando a octubre de 2008 con 187,078 MVA, de los cuales 76.78% corresponde a subestaciones de transmisión y el restante 23.22% a subestaciones de distribución.

#### Capacidad en subestaciones (GVA)

Tipo de Subestación	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010*
Transmisión	113.6	119.7	125.1	128.8	134.7	137	141.7	143.8	147.1	147.2
Distribución	33.1	36.2	37.7	38.8	39.7	41	42.7	43.7	45.7	43.7
<b>Total</b>	<b>146.6</b>	<b>155.9</b>	<b>162.8</b>	<b>167.6</b>	<b>174.4</b>	<b>178</b>	<b>184.4</b>	<b>187.5</b>	<b>192.8</b>	<b>190.9</b>

GVA = un millón de kVA

La red de distribución esta integrada por las líneas de subtransmisión con niveles de tensión de 138, 115, 85 y 69 kilovolts; así como, las de distribución en niveles de 34.5, 23, 13.8, 6.6, 4.16 y 2.4 kV y baja tensión. A octubre de 2008, la longitud de estas líneas fue de 47,176 km y 627,880 km, respectivamente.

**Longitud de líneas de distribución (miles de km)**

Nivel de tensión (kV)	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010*
<b>Subtransmisión</b>										
138	1	1	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5
115	36.1	38	38.7	40.1	40.8	42.2	43.3	42.7	42.3	42.3
85	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
69	3.3	3.3	3.3	3.2	3.2	3.2	3.1	3.1	3.0	3.0
Subtotal	40.7	42.6	43.6	44.9	45.6	46.9	47.9	47.3	46.8	46.8
<b>Distribución</b>										
34.5	61.7	62.7	63.6	64.7	66.3	67.4	69.3	70.4	71.8	71.8
23	24.6	25.8	26.3	27.4	27.9	28.6	29.1	29.8	30.7	30.7
13.8	246.3	251.7	257.4	264.5	269.4	273.2	278.1	286.3	289.1	289.4
6.6 1_/_	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2
Baja tensión	221	222.1	225.1	230.2	233	236.6	239.3	245.9	250.0	250.3
Subtotal	554.3	563	573.2	587.5	597.1	606.3	616.3	633	641.8	642.4
Total de líneas	595.1	605.7	616.8	632.4	642.7	653.2	664.2	680.3	688.6	689.2
Total CFE 2_/_	632	644.9	658	676.4	688.4	700.7	712.8	729.3	737.9	738.5

1\_/\_/ Incluye tensiones de 4.16 y 2.4 kV  
 2\_/\_/ El total incluye líneas de Transmisión

\*Cifras a diciembre de 2009

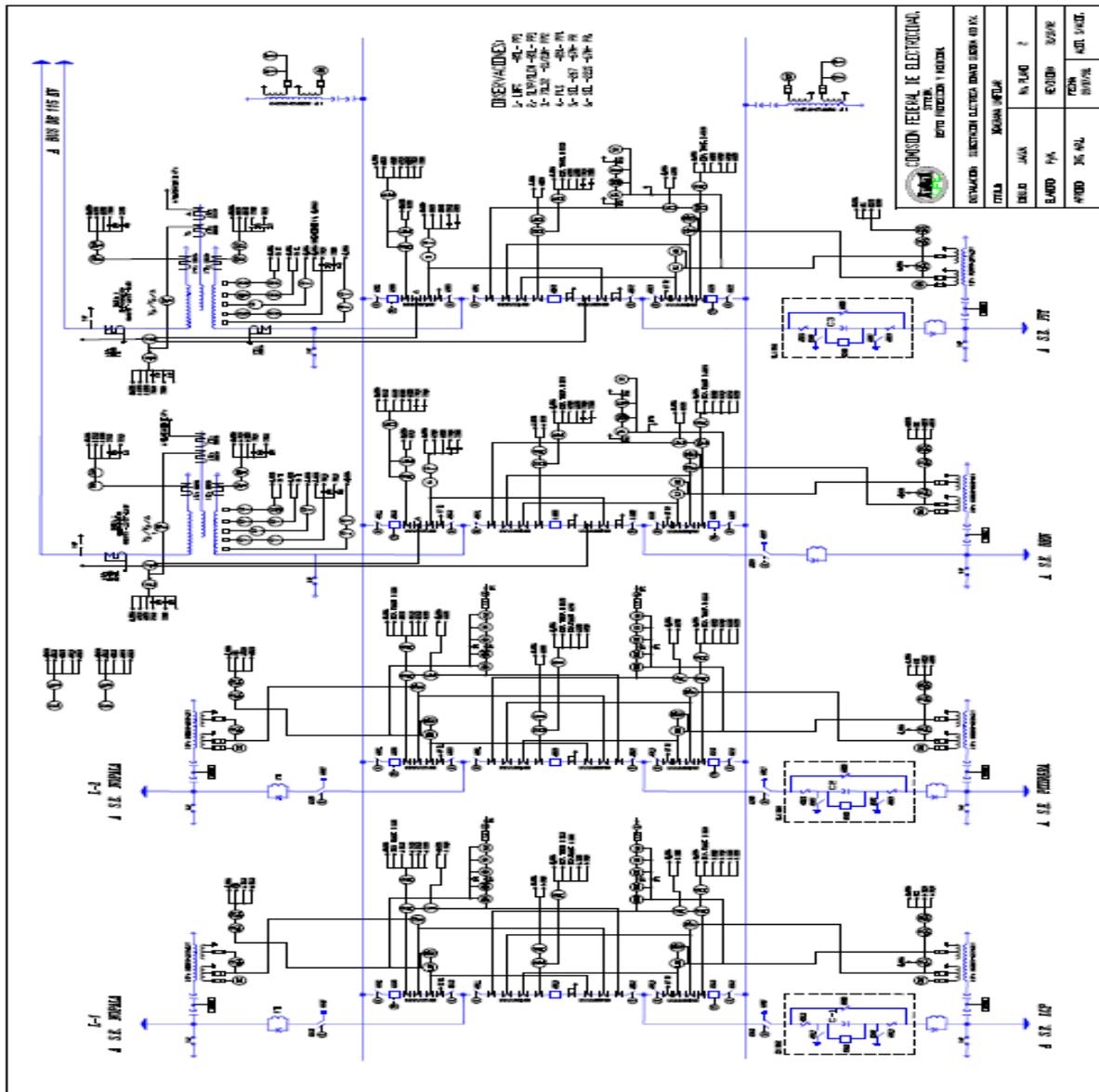


Fig. 3.2. Diagrama Unifilar Subestación Donato Guerra

Resaltamos el impacto de los últimos avances en las tecnologías soporte de los HVDC y FACTS, mencionando algunos de los beneficios obtenidos con dichos avances:

1. Control independiente mejorado de activa y reactiva
2. Menores pérdidas activas y reactivas en el switcheo de semiconductores
3. Disminución de requerimientos de compensación reactiva en los proyectos de HVDC y FACTS
4. Disminución de equipos pasivos de filtrado
5. Se aumenta la viabilidad del HVDC y de FACTS por disminución de costos del proyecto y costos de operación, con lo que la distancia de equilibrio en la construcción de una línea de AC y una de DC disminuye.

6. Potencialidad de nuevos negocios de servicios complementarios en transmisión como control de voltaje, control de flujo o soporte de estabilidad angular y de voltaje.
7. Baja potencia de cortocircuito en los enlaces HVDC

Podemos decir entonces, muy reducidamente por cuestiones de espacio, que con el estado actual de desarrollo de dichas tecnologías, al instalar proyectos de HVDC y FACTS desarrollamos los siguientes beneficios:

1. Instalación rápida: se pueden completar entre 12 y 18 meses.
2. Incremento de la capacidad del sistema, descongestionándola, eliminando cuellos de botella, escurriendo la red, y aprovechando realmente la capacidad instalada, con lo que se puede muchas veces aplazar la construcción de nuevas líneas de transmisión aéreas, lo cual es ambientalmente cuestionado actualmente.
3. Se aumenta la confiabilidad y controlabilidad del sistema, por su rápida respuesta e “inteligencia” intrínseca, ayudando a conservar la integridad de la red.
4. Al ser ambientalmente amigables, se pueden obtener beneficios fiscales, que pueden viabilizar más los proyectos.
5. Ya es más viable económicamente establecer conexiones robustas por medio de enlaces HVDC entre sistemas débiles, o cuando solo uno de ellos es débil, o se tengan diferentes frecuencias, maximizando la potencia que se puede transferir de un sistema al otro.

### **3.2. Prospectiva del Incremento de la transmisión de potencia en las líneas existentes**

Es necesario hacer un planteamiento a futuro sobre la transmisión de potencia eléctrica, lo cual trae consigo diferentes situaciones como lo es la que se planteo desde un principio en esta tesis (que se tenga que transmitir mucho más potencia por una línea existente), estas situaciones necesitan soluciones y en cada caso adoptarlas.

Es por eso que cuando se plantea un proyecto se considera que en la búsqueda de optimizaciones parciales no se debe olvidar la optimización global del proyecto, tanto inicial como en el tiempo considerando el futuro crecimiento de la red, que deberá adaptarse siempre a un futuro lejano e incierto.

La vida del hombre se desarrolla mirando adelante, se responden preguntas, ¿que hacer mañana, en un mes, en un año, o mas allá?, los 10 años son una esperanza, un sueño. La vida de un país pujante piensa en un año, en 10 en 100 y más, ya que los hombres se suceden y el país permanece. Si bien el futuro es incierto, es necesario plantear un futuro posible, y este pondrá a la vista necesidades cuya satisfacción requiere a veces algún año de preparación, pensemos en el antiguo Egipto, sus años de vacas gordas y de vacas flacas obligaron a planear, construir para guardar.

Se planean las obras del futuro, una mezcla de sueño para el futuro lejano y urgencia para el futuro próximo. Indudablemente los sueños del futuro ayudan a construir el futuro, así se plantean obras, se comienzan a construir, se terminan (o no!), se utilizan (o no!), se aprovechan (o no!), se saturan (o no!), se deben replantear.

Concretemos en nuestro tema, frente a una línea de transmisión eléctrica, se puede tratar de un línea que ha crecido sin planes, sin control, y para ella se desea una línea nueva bien planteada y que prevea la expansión futura, siendo una línea con servicio eléctrico su potencia de transmisión es conocida, la nueva línea provocara un incremento transmisión de potencia, por otra parte la línea deberá ser satisfactoria por muchos años en los que crecerá la transmisión, el proyecto debe tener un estado final que permita transmitir mucho más potencia a futuro, e inicialmente se harán parte de las obras para que en el estado inicial se tenga optimo servicio, y se dejaran las provisiones para acompañar el desarrollo a medida que el consumo lo exija.

Aunque parezca que no vale la pena, también en áreas que fueron bien planeadas y se desarrollaron correctamente, puede ser útil plantear un estudio como arriba sugerido, quizás de este estudio se llegue a concluir que conviene ir haciendo cambios importantes, tratando de aprovechar más los adelantos tecnológicos, u otras acciones, como por ejemplo añadir un capacitor serie en la línea.

Necesitamos anticiparnos al futuro, antes de la crisis aparezca y colapse lo que hay. El desarrollo libre de obstáculos, genera necesidades y nos obliga a anticipar el futuro. Al soñar lo que se necesita nos basamos en cómo crece la generación de potencia, como aumenta la superficie que nuestra obra debe cubrir, son ideas que hacen tomar forma (si se realizan las obras) a nuestra realidad de mañana.

Una serie de factores que intervienen en el diseño de la red se encuentran bajo el control del proyectista, la elección de unos fija el valor de otros.

- Potencia transmitida
- Tensión de la línea
- Factor de potencia
- Impedancia de la línea
- Perdidas de la línea
- Tamaño, resistencia y reactancia de los conductores
- Costos

Con el correcto diseño de la línea se trata de obtener:

- Calidad aceptable del servicio
- Economía de diseño de la línea
- Combinación optima de la potencia de transmisión, tensiones y factor de potencia
- Correcto dimensionamiento de los circuitos con aceptable utilización de los componentes
- Selección de los puntos del sistema donde debe preverse económicamente inserción de capacitores

Veamos entonces el dato más importante que afecta el planteamiento de una línea

- Potencia de transmisión actual
- Aumento de la potencia
- Tensión de la línea, factor de potencia
- Modificación de la línea por la inserción de capacitores serie

El crecimiento que se plantea debe tener una opción optimista y una opción pesimista, en base a la que hoy puede preverse. Las condiciones inmediatas se pueden prever con la tasa de crecimiento actual, pero las condiciones del futuro deben considerar tasas de crecimiento basadas en periodos representativos, largos, el futuro lejano puede ser víctima de la saturación, o de la aparición de otras opciones que compiten.

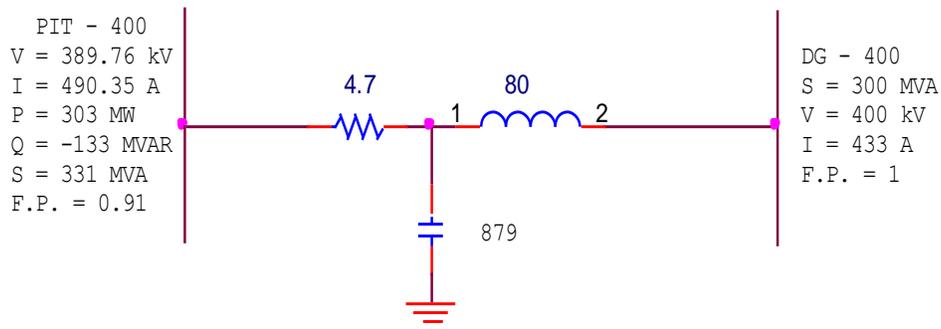
Hagamos un ejemplo, dos líneas unen generación y carga transmitiendo 3000 MW, el crecimiento es tal que a los 10 años se construye una tercera línea, y a los 5 años una cuarta... las obras son cada vez más rápidamente amortizadas, se aprovechan más rápidamente, pero las inversiones son cada vez más frecuentes, las soluciones técnicas deben ser cada vez más rápidas (y en consecuencia de visión más corta), no se pago un crédito que hay que contraer otro... estos hechos denuncian que la solución es equivocada.

Como parte de esta solución se proponen los capacitores serie en líneas de transmisión, ya que con estos se ahorra en costos y espacio, evitando así problemas con los permisos y con los terrenos o con el área donde se trabajara, problemas de frontera y de terreno deformado e inadecuado, etc.

### 3.2.1. Análisis de líneas existentes con compensación y sin compensación.

En esta sección encontraremos TRES casos de análisis de la línea PIT-DOG-400 donde se analizan varios casos de operación con compensación y sin compensación.

- 1) TRANSMISION DE 300 MVA, F.P = 1 EN DONATO GUERRA, sin compensación.



$$V_z = I_R \left[ \frac{R}{2} + \frac{jX_L}{2} \right]$$

$$\tilde{V}_T = \tilde{V}_R + \tilde{I}_R \left[ \frac{R}{2} + \frac{jX_L}{2} \right] = (230.9401[KV]) + (433)[A] \left( \frac{4.7}{2} + \frac{j80}{2} \right)$$

$$\tilde{V}_T = [231.9576 + j17.320][KV]$$

$$\tilde{V}_T = 232.6033[KV] \angle 4.27^\circ$$

$$\tilde{I}_c = \frac{\tilde{V}_T}{-jX_c} = \frac{232.6033[KV] \angle 4.27^\circ}{879[\Omega] \angle -90} = 264.3227[A] \angle 94.27^\circ$$

$$\tilde{I}_c = [-19.7042 + j263.8881][A]$$

$$\tilde{I}_G = \tilde{I}_R + \tilde{I}_c = 433 - 19.7042 + j263.8881[A]$$

$$\tilde{I}_G = [413.2957 + j263.8881][A]$$

$$\mathbf{490.3573[A] \angle 32.55^\circ}$$

$$\tilde{V}_G = \tilde{V}_T + \tilde{I}_G \left[ \frac{R}{2} + j \frac{X_L}{2} \right]$$

$$= [231.9576 + j17.320][KV] + [413.2957 + j263.8881] \left[ \frac{4.7}{2} + j \frac{80}{2} \right]$$

$$[222.3733 + j34.4719][KV]$$

$$225.0293[KV] \angle 8.81$$

$$\sqrt{3} * [225.0293[KV]]$$

$$\mathbf{389.7622[KV] \angle 8.81^\circ + 30^\circ}$$

$$S_G = P_G + jQ_G = V_G I_G^*$$

$$S_G = ([222.3733 + j34.4719])[KV] (413.2957 - j263.8881)[A]$$

$$S_G = 101.0013[MW] - j44.4347[MVAR]$$

$$S_G = 110.3436[MVA]$$

$$\mathbf{S_{G3\phi} = 3(110.3436) = 331.0310[MVA]}$$

$$\mathbf{P_{G3\phi} = 3(101.0013)[MW] = 303.0041[MW]}$$

$$Q_{G3\phi} = 3(-44.4347)[MVAR] = -133.3043[MVAR]$$

$$F.P = \cos \theta = \cos(8.81 - 32.55)$$

$$= 0.91$$

$$I_0 = \frac{\tilde{V}_G}{\frac{R}{2} + j\frac{X_L}{2} - jX_C}$$

$$I_0 = \frac{[222.3733 + j34.4719][KV]}{\left[\frac{4.7}{2} + j\frac{80}{2} - j879\right][\Omega]}$$

$$I_0 = (-40.3441 + j265.1586)[A]$$

$$V_{R_0} = -jX_C \tilde{I}_0$$

$$V_{R_0} = -j879(-40.3441 + j265.1586)$$

$$= [233.0744 + j35.4625][KV]$$

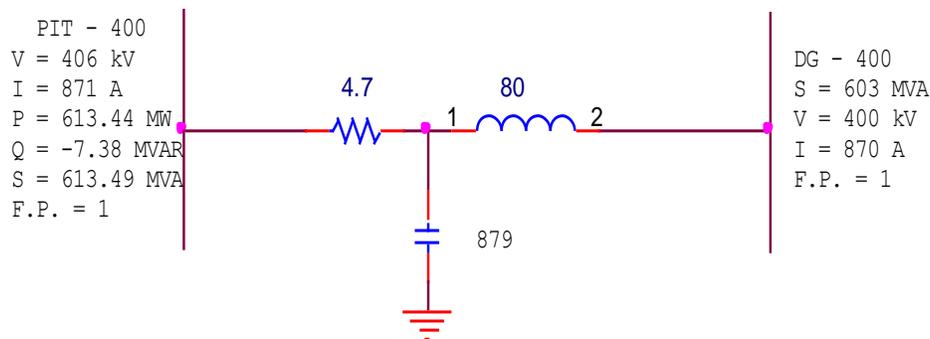
$$= 235.7568[KV]$$

$$\%Reg = \frac{V_{R_0} - V_R}{V_R} \times 100$$

$$= \frac{235.7568[KV] - 230.9401[KV]}{230.9401[KV]} \times 100$$

$$= 2.08\%$$

2) TRANSMISION DE 603 MVA, F.P = 1 EN DONATO GUERRA, sin compensación



$$V_z = I_R \left[ \frac{R}{2} + \frac{jX_L}{2} \right]$$

$$\tilde{V}_T = \tilde{V}_R + \tilde{I}_R \left[ \frac{R}{2} + \frac{jX_L}{2} \right] = (230.9401[KV]) + (870)[A] \left( \frac{4.7}{2} + \frac{j80}{2} \right)$$

$$\tilde{V}_T = [232.9846 + j34.8][KV]$$

$$\tilde{V}_T = 235.5692[KV] \angle 8.49^\circ$$

$$\tilde{I}_c = \frac{\tilde{V}_T}{-jX_c} = \frac{235.5692[KV] \angle 8.49^\circ}{879[\Omega] \angle -90} = 267.9968[A] \angle 98.49^\circ$$

$$\tilde{I}_c = [-39.5904 + j265.0564][A]$$

$$\tilde{I}_G = \tilde{I}_R + \tilde{I}_c = 870 - 39.5904 + j265.0564[A]$$

$$\tilde{I}_G = [830.4095 + j265.0564][A]$$

$$\mathbf{871.6851[A] \angle 17.70^\circ}$$

$$\tilde{V}_G = \tilde{V}_T + \tilde{I}_G \left[ \frac{R}{2} + j \frac{X_L}{2} \right]$$

$$= [232.9846 + j34.8][KV] + [830.4095 + j265.0564] \left[ \frac{4.7}{2} + j \frac{80}{2} \right]$$

$$[224.3338 + j68.6392][KV]$$

$$234.5996[KV] \angle 17.01$$

$$\sqrt{3} * [234.5996[KV]]$$

$$\mathbf{406.3385[KV] \angle 17.01^\circ + 30^\circ}$$

$$S_G = P_G + jQ_G = V_G I_G^*$$

$$S_G = ([224.3338 + j68.6392])[KV] (830.4095 - j265.0564)[A]$$

$$S_G = 204.4821[MW] - j2.4624[MVAR]$$

$$S_G = 204.497[MVA]$$

$$\mathbf{S_{G3\phi} = 3(204.4821) = 613.491[MVA]}$$

$$\mathbf{P_{G3\phi} = 3(204.4821)[MW] = 613.4465[MW]}$$

$$Q_{G3\phi} = 3(-2.4624)[MVAR] = -7.3873[MVAR]$$

$$F.P = \cos \theta = \cos(17.01 - 17.70)$$

$$= 0.99999$$

$$I_0 = \frac{\tilde{V}_G}{\frac{R}{2} + j\frac{X_L}{2} - jX_C}$$

$$I_0 = \frac{[224.3338 + j68.6392][KV]}{\left[\frac{4.7}{2} + j\frac{80}{2} - j879\right][\Omega]}$$

$$I_0 = (-81.0611 + j267.6094)[A]$$

$$V_{R_0} = -jX_C \tilde{I}_0$$

$$V_{R_0} = -j879(-81.0611 + j267.6094)$$

$$= [235.2286 + j71.2527][KV]$$

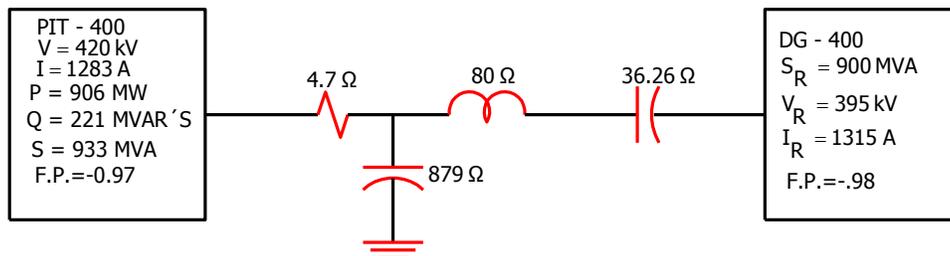
$$= 245.7834[KV]$$

$$\%Reg = \frac{V_{R_0} - V_R}{V_R} \times 100$$

$$= \frac{245.7834[KV] - 230.9401[KV]}{230.9401[KV]} \times 100$$

$$= 6.42\%$$

3) TRANSMISIÓN DE 900 MVA, F.P.=-0.98 EN DONATO GUERRA.



$$V_z = I_R \left[ \frac{R}{2} + \frac{jX_L}{2} - jX_S \right]$$

$$\tilde{V}_T = \tilde{V}_R + \tilde{I}_R \left[ \frac{R}{2} + \frac{jX_L}{2} - jX_S \right] = \left( \frac{395[KV]}{\sqrt{3}} \right) + (1290.83 - j250.91)[A] \left( \frac{4.7}{2} + \frac{j80}{2} - j36.26 \right)$$

$$\tilde{V}_T = [232.0251 + j4.238][KV]$$

$$\tilde{V}_T = 232.063[KV] \angle 1.04^\circ$$

$$\tilde{I}_c = \frac{\tilde{V}_T}{-jX_c} = \frac{232.063[KV] \angle 1.04^\circ}{879[\Omega] \angle -90^\circ} = 264.008[A] \angle 91.04^\circ$$

$$\tilde{I}_c = [-4.821 + j263.9649][A]$$

$$\tilde{I}_G = \tilde{I}_R + \tilde{I}_c = 1290.83 - j250.91 - 4.821 + j263.9649[A]$$

$$\tilde{I}_G = [1286.009 + j13.054][A]$$

$$\mathbf{1286.0752[A] \angle 0.58^\circ}$$

$$\tilde{V}_G = \tilde{V}_T + \tilde{I}_G \left[ \frac{R}{2} + j \frac{X_L}{2} \right]$$

$$= [232.0251 + j4.238][KV] + [1286.009 + j13.054] \left[ \frac{4.7}{2} + j \frac{80}{2} \right]$$

$$[234.562 + j55.709][KV]$$

$$241.087[KV] \angle 13.36^\circ$$

$$\sqrt{3} * [241.087[KV]]$$

$$\mathbf{417.576[KV] \angle 13.36^\circ + 30^\circ}$$

$$S_G = P_G + jQ_G = V_G I_G^*$$

$$S_G = ([234.562 + j55.709])[KV](1286.009 - j13.054)[A]$$

$$S_G = 298.5868[MW] + j70.915[MVAR]$$

$$S_G = 306.8925[MVA]$$

$$\mathbf{S_{G3\phi} = 3(306.8925) = 920.6777[MVA]}$$

$$\mathbf{P_{G3\phi} = 3(298.5868)[MW] = 895.7604[MW]}$$

$$Q_{G3\phi} = 3(70.915)[MVAR] = 212.745[MVAR]$$

$$\begin{aligned} F.P &= \cos \theta = \cos(13.36 - 0.58) \\ &= 0.97 \end{aligned}$$

$$I_0 = \frac{\tilde{V}_G}{\frac{R}{2} + j\frac{X_L}{2} - jX_C}$$

$$I_0 = \frac{[234.562 + j55.709][KV]}{\left[\frac{4.7}{2} + j\frac{80}{2} - j879\right][\Omega]}$$

$$I_0 = (-65.6156 + j279.757)[A]$$

$$V_{R_0} = -jX_C \tilde{I}_0$$

$$V_{R_0} = -j879(-65.6156 + j279.757)$$

$$= [245.9064 + j57.6761][KV]$$

$$= 252.579[KV]$$

$$\%Reg = \frac{V_{R_0} - V_R}{V_R} \times 100$$

$$= \frac{252.579[KV] - 228.05[KV]}{228.05[KV]} \times 100$$

$$= 10.75\%$$