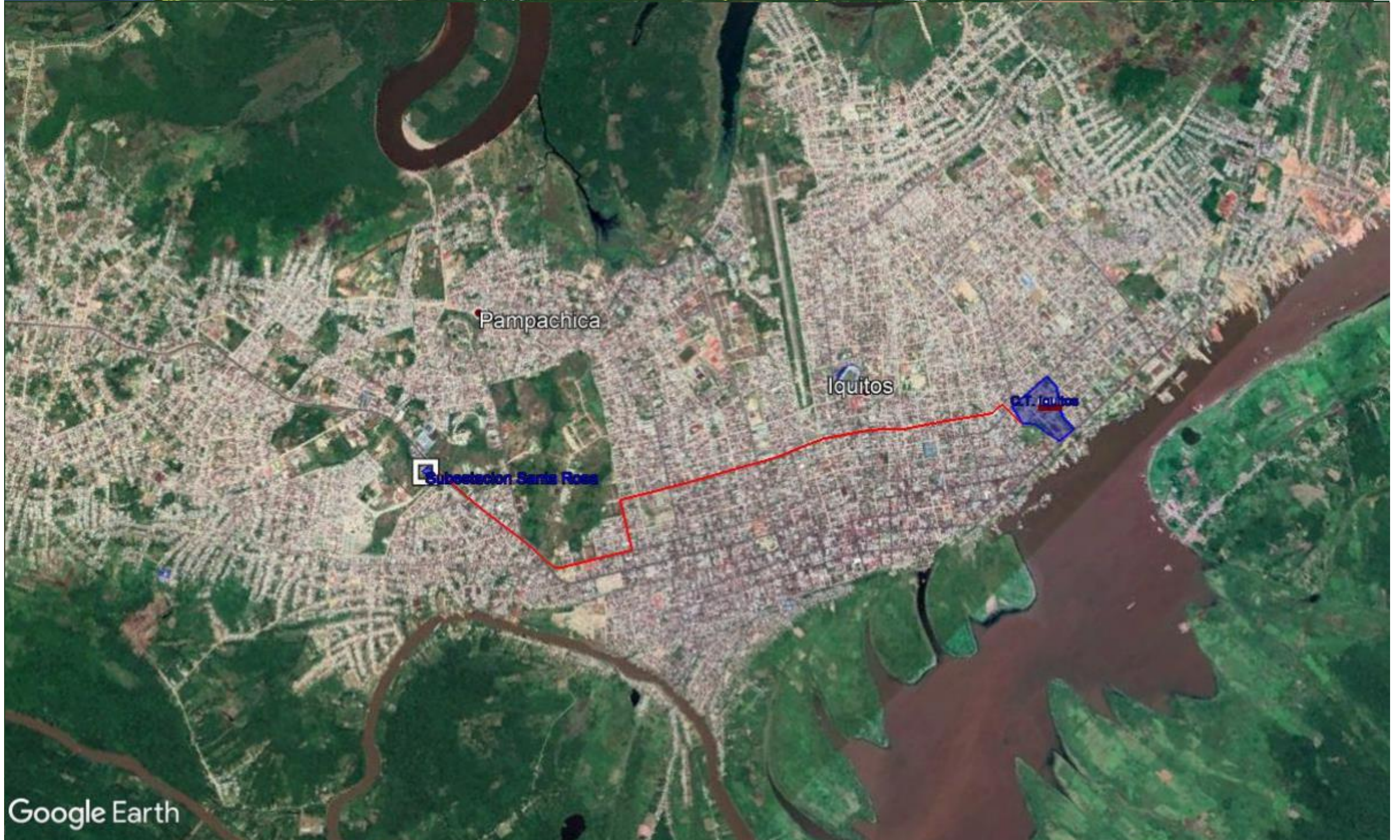


ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TENSION EN EL SISTEMA AISLADO DE IQUITOS

Marco referencial

El sistema eléctrico Iquitos



Pampachica

Iquitos

E.T. Iquitos

Subestacion Santa Rosa

El Problema

- El sistema eléctrico Iquitos es muy sensible a eventos como la salida de generadores o conexión de cargas en horas punta.
- El crecimiento de la demanda de energía en el sistema aislado Iquitos al año 2019 será de aproximadamente 91.08 MW en un escenario optimista, siendo la potencia instalada actual de 64,65 MW, lo que hará que el déficit de energía sea de 26.43 MW, como se dijo este será un factor que incrementara significativamente la inestabilidad del sistema.
- Los estudios de operatividad realizados en el sistema solo mencionan análisis de estabilidad angular y estabilidad transitoria, no existen antecedentes de estudios de estabilidad de tensión en el sistema aislado Iquitos.

Planteamiento del problema

¿Cómo mejorar la estabilidad de tensión del sistema eléctrico aislado Iquitos?

- I. ¿Cómo están las condiciones de operación actual del sistema?*
- II. ¿Cuáles son los elementos más sensibles a la inestabilidad de tensión y cual el nivel de estabilidad de tensión del sistema eléctrico Iquitos?*
- III. ¿Cuál es la medida de control más óptima para mejorar la estabilidad de tensión en el sistema eléctrico aislado Iquitos?*

Objetivos

Estudiar la estabilidad de tensión en el sistema eléctrico aislado Iquitos para proponer medidas que mejoren la estabilidad de tensión.

- I. Diagnosticar las condiciones de operación en estado estacionario, del sistema eléctrico aislado Iquitos*
- II. Determinar los elementos más sensibles a la inestabilidad de tensión en el sistema así como el nivel de estabilidad de tensión en el sistema Iquitos.*
- III. Analizar y proponer medidas de control para seleccionar la solución técnica más adecuada para mejorar la operación en estado estacionario del sistema eléctrico Iquitos.*

Hipótesis

El estudio de la estabilidad de tensión en el sistema aislado Iquitos permite seleccionar una alternativa para mejorar la estabilidad de tensión.

- I. El diagnóstico de la operación actual en el sistema permite conocer las condiciones de operación actual del sistema.*
- II. Estudiar la estabilidad de tensión mediante el análisis de sensibilidad y el análisis modal permite determinar las barras y elementos más sensibles al sufrir inestabilidad de tensión en el sistema y el uso de las curvas PV y QV permite conocer la proximidad al punto de colapso de tensión para determinar el nivel de estabilidad del sistema.*
- III. Se proponen medidas para mejorar la estabilidad de tensión en el sistema, se analiza cada una definiendo las ventajas y desventajas y se selecciona la alternativa técnica más adecuada*

Variables		Dimensión	Indicador
Dependientes	Estabilidad de tensión	▪ Sensibilidad de las barras ▪ Proximidad al punto de colapso en las barras.	▪ V/MW (voltios/megawatt) ▪ MW(Megawatt)
Independientes	Sistema eléctrico Iquitos	▪ Topología de la red ▪ Modelos de los elementos del sistema eléctrico	▪ Configuración de la red eléctrica ▪ Impendancia:Z Ω/km ▪ Admintancia:P.U. Ω/km

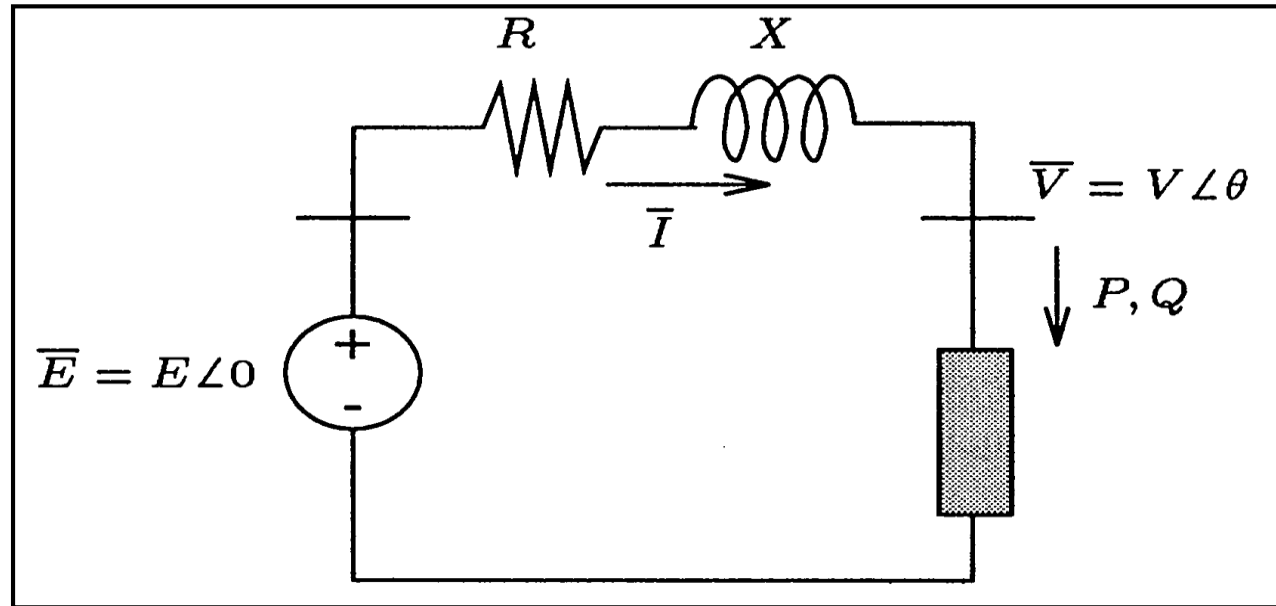
Marco Teórico

Estabilidad de tensión

- Se puede determinar que un sistema es estable si los valores de tensión en los nodos se aproximan a valores aceptables antes y después de someterse a una perturbación

Inestabilidad de tensión

- Un SEP es inestable en voltaje si después de haber sufrido un disturbio las magnitudes de los voltajes en los nodos tienden a bajar de una manera progresiva.



$$\bullet P = -\frac{EV}{X} \sin \theta$$

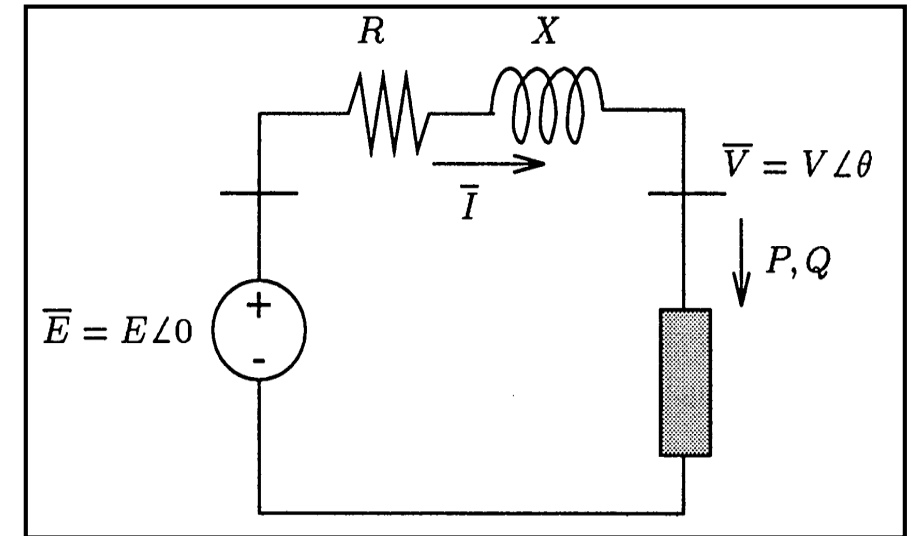
$$\bullet Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos \theta$$

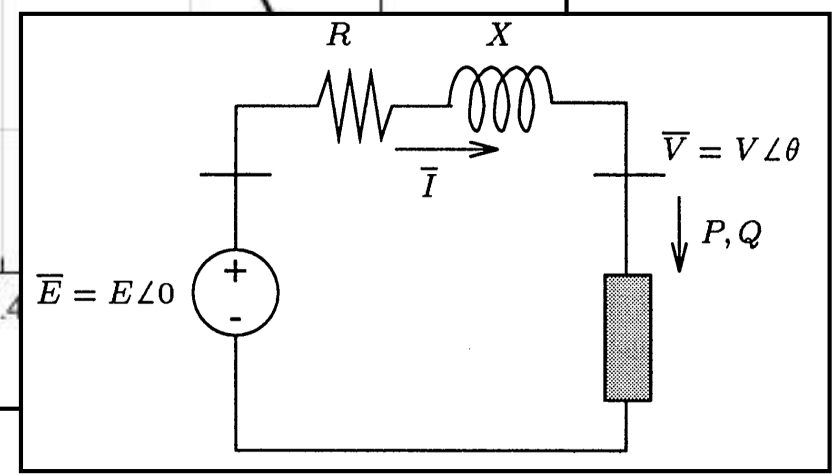
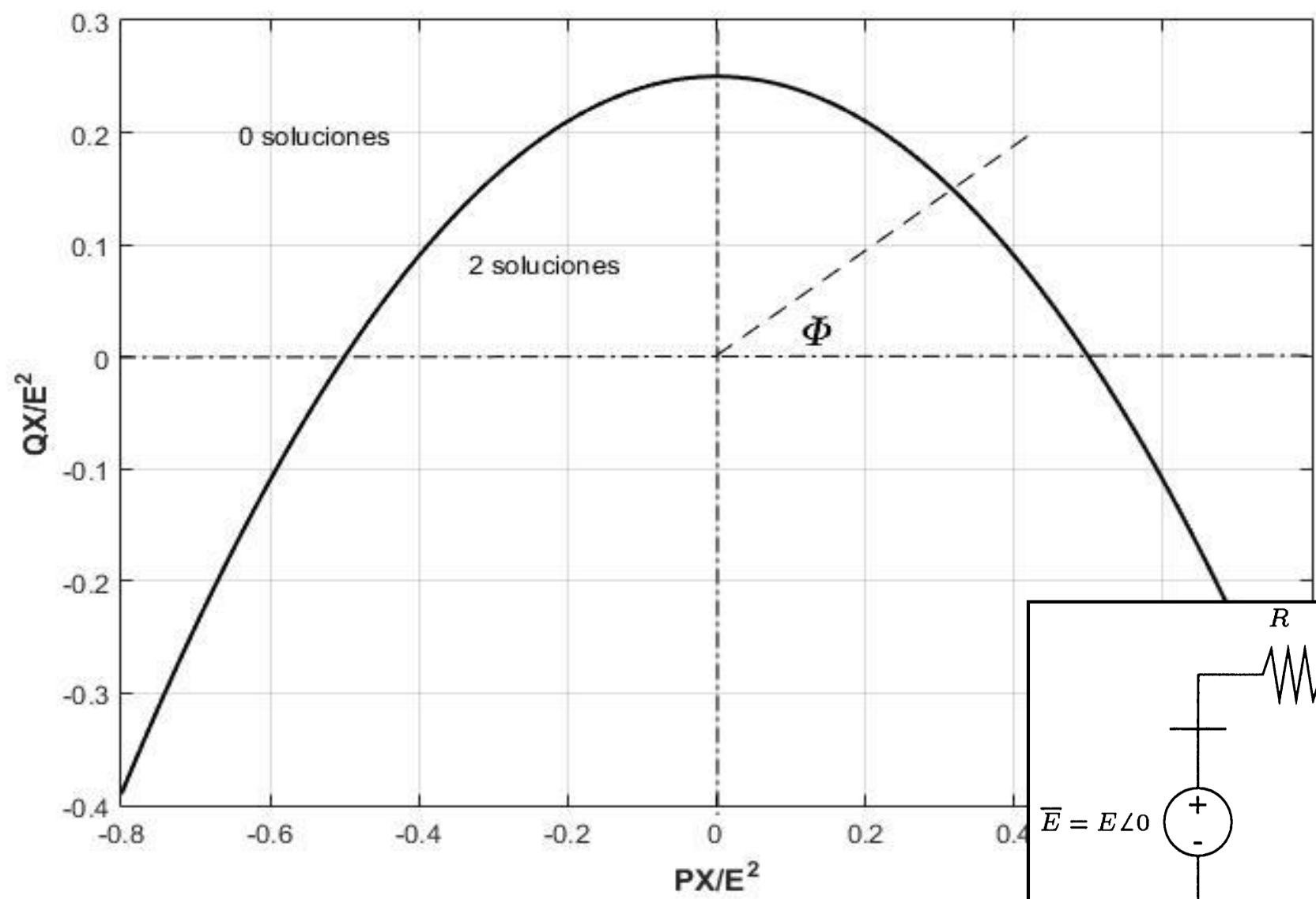
- ✓ P y θ están fuertemente ligados al igual
- ✓ Q y V están fuertemente ligados

- $(V^2)^2 + (2QX - E^2)V^2 + X^2(P^2 + Q^2) = 0$

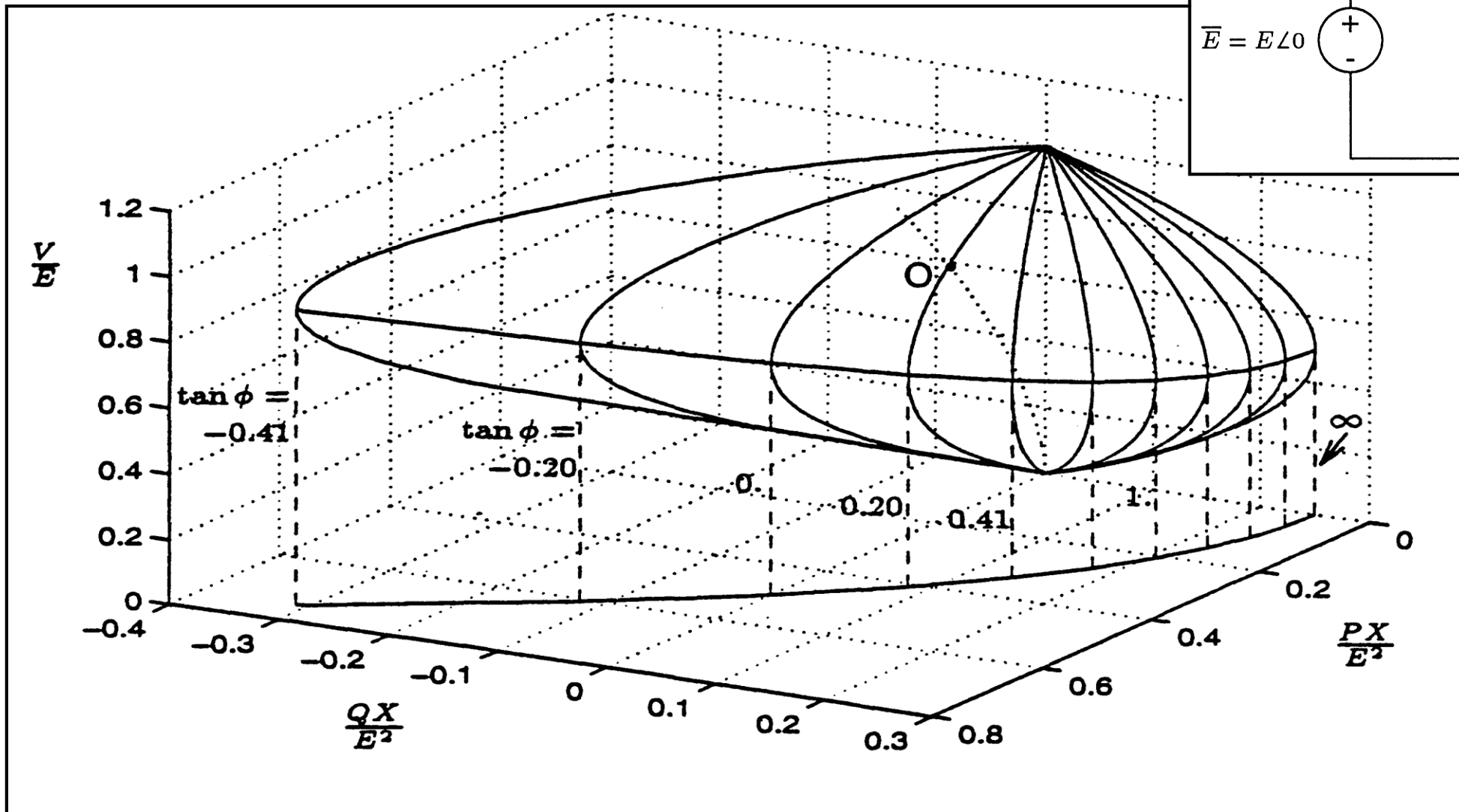
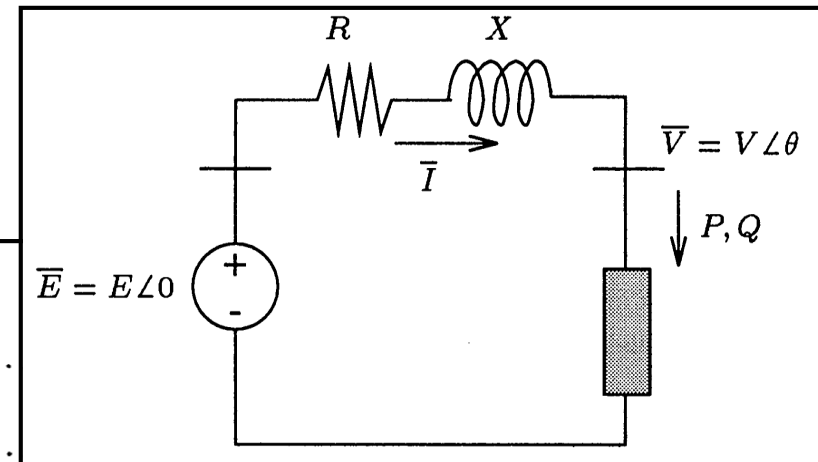
- $(2QX - E^2)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2) \geq 0$

- $-P^2 - \frac{E^2}{X}Q + \left(\frac{E^2}{2X}\right)^2 \geq 0$

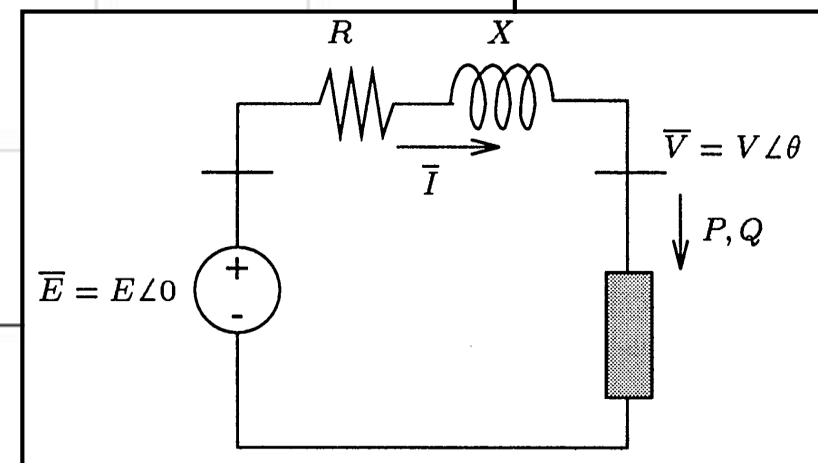
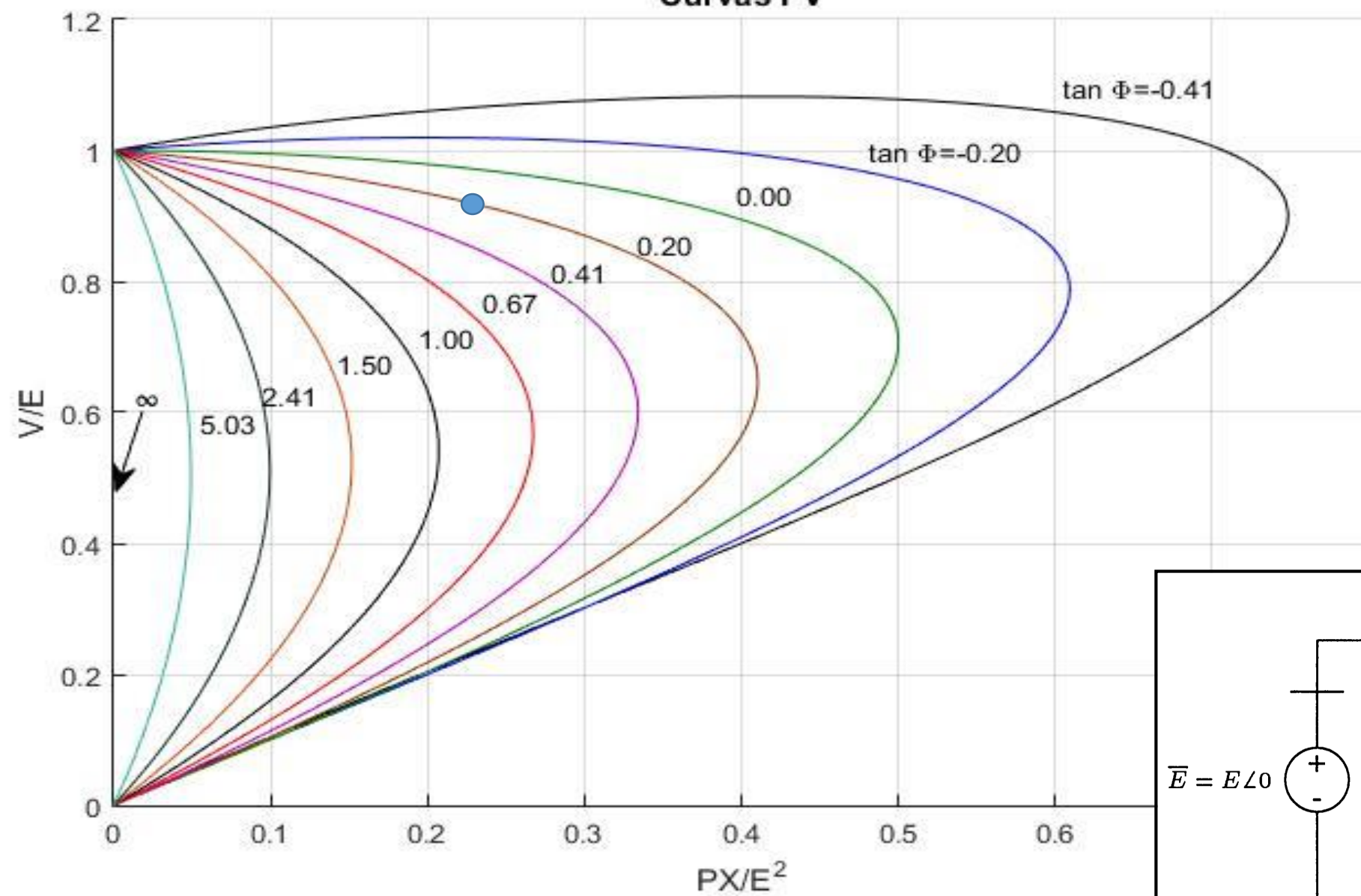




$$\bullet V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX} \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X^2 P^2 - XE^2 Q}$$



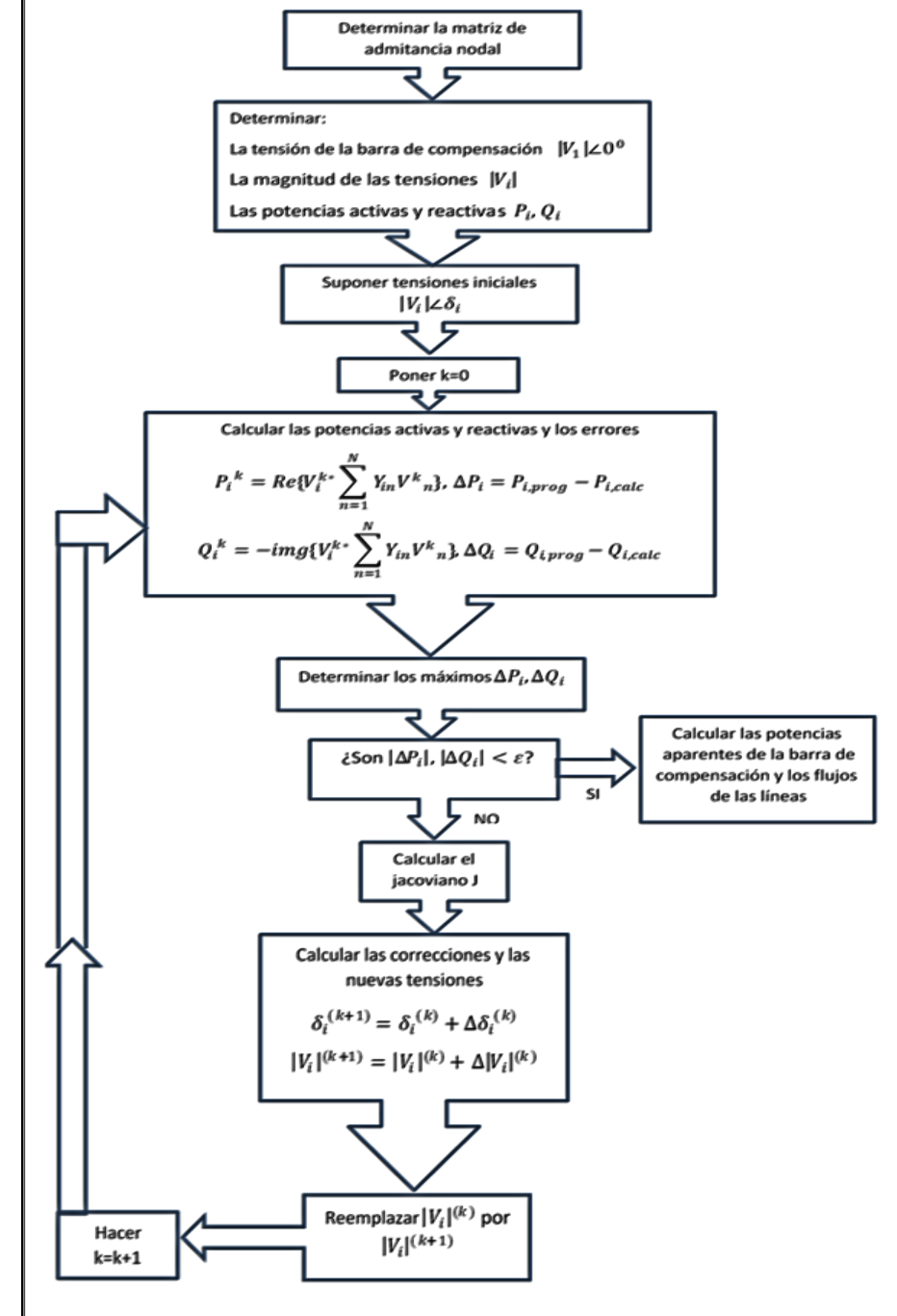
Curvas PV



$$P_i = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |Y_{in} V_n V_i| \cos(\theta_{ij} + \delta_n - \delta_i)$$

$$Q_i = -|V_i|^2 B_{ii} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |Y_{in} V_n V_i| \sin(\theta_{ij} + \delta_n - \delta_i)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_i}{\partial \delta_n} \\ \vdots & J_{11} & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \\ \hline \frac{\partial P_i}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_i}{\partial \delta_n} \\ \vdots & J_{21} & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |V_2| \frac{\partial P_i}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial P_i}{\partial |V_n|} \\ \vdots & J_{12} & \vdots \\ |V_2| \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} & \dots & |V_n| \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \hline |V_2| \frac{\partial P_i}{\partial |V_2|} & \dots & |V_n| \frac{\partial P_i}{\partial |V_n|} \\ \vdots & J_{22} & \vdots \\ |V_2| \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} & \dots & |V_n| \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \frac{\Delta |V_2|}{|V_2|} \\ \vdots \\ \frac{\Delta |V_n|}{|V_n|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\delta} & J_{PV} \\ J_{Q\delta} & J_{QV} \end{bmatrix}$$

$$J_R = J_4 - J_3 J_1^{-1} J_2$$

$$\Delta Q = J_R \Delta V$$

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q$$

$$A\phi = \lambda\phi$$

$$(A - \lambda I) = 0$$

$$\det(A - \lambda I) = 0$$

- Mediante la expansión de la determinante en la ecuación anterior, se obtienen las características de la ecuación; obteniendo las n soluciones de $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, representando estas los valores propios de A.

$$\phi_i = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \\ \phi_{2i} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \end{bmatrix}$$

$$\psi_j^T = [\psi_{j1} \psi_{j2} \dots \psi_{jn}]$$

$$\boldsymbol{\psi}^T . \boldsymbol{A} . \boldsymbol{\phi} = \Lambda$$

$$\Lambda = \textit{Diag}(\lambda_i) = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_n \end{bmatrix}$$

$$J_R = \xi \cdot \Lambda \cdot \eta$$

- ξ : Matriz vector propio derecho de J_R
- η : Matriz vector propio izquierdo de J_R
- Λ : Matriz diagonal de los valores propios de J_R

$$\Delta V = \xi \cdot \Lambda^{-1} \cdot \eta \cdot \Delta Q$$

$$\eta \cdot \Delta V = \Lambda^{-1} \cdot \eta \cdot \Delta Q$$

$$\mathbf{v}_i = \frac{1}{\lambda_i} \mathbf{q}_i$$

Si $\lambda_i > 0$, las variaciones del i-esimo voltaje modal está en función al cambio de potencia reactiva, A medida que λ_i va disminuyendo, el sistema tendrá más probabilidad a ser inestable.

Si $\lambda_i = 0$, El i-esimo voltaje modal colapsa, cualquier cambio en la potencia reactiva modal produce un cambio infinito en el voltaje modal.

Si $\lambda_i < 0$, el i-esimo voltaje modal y potencia reactiva están en direcciones opuestas, indicando que el sistema es inestable en tensión.

Diagnostico del sistema

EQUIPAMIENTO DEL SISTEMA ELÉCTRICO AISLADO DE IQUITOS



El sistema eléctrico aislado de Iquitos esta constituido por un sistema de generación, transmisión y distribución, perteneciente a la Empresa Electro Oriente S.A, que se encarga de brindar el servicio de energía eléctrica a la población de Iquitos

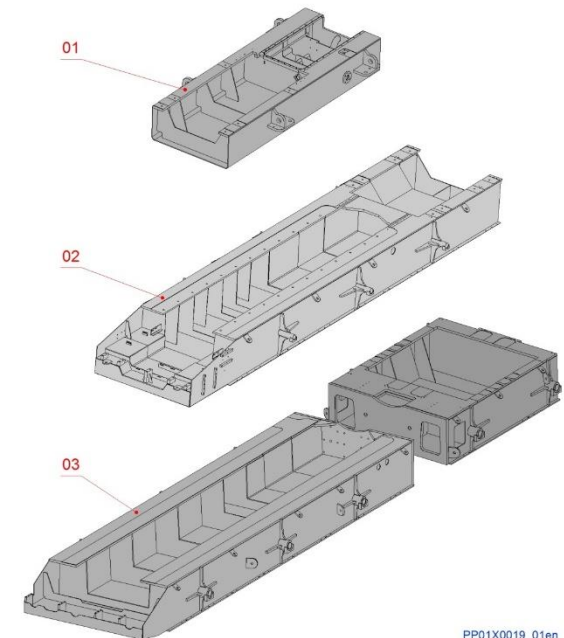
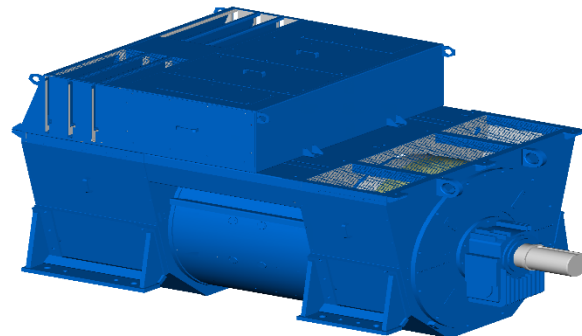
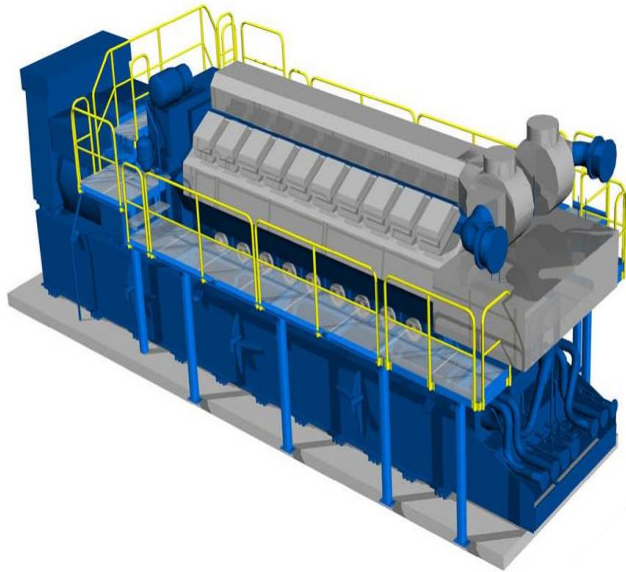


SISTEMA DE GENERACIÓN

Grupo electrógeno

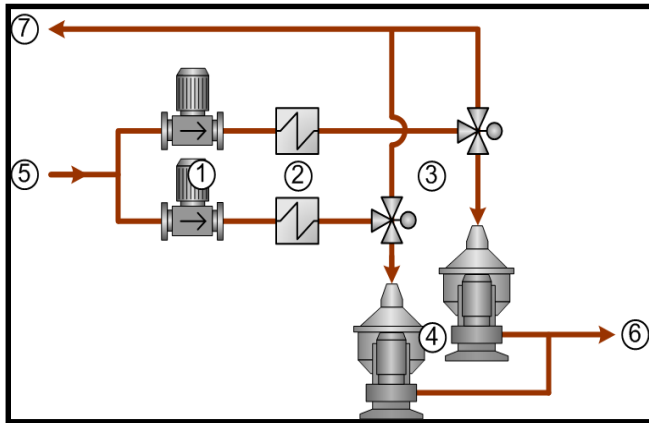


- Motor
- Generador
- Acoplamiento.
- Marco base
- Montaje flexible
- Plataformas de servicio
- Sistemas auxiliares



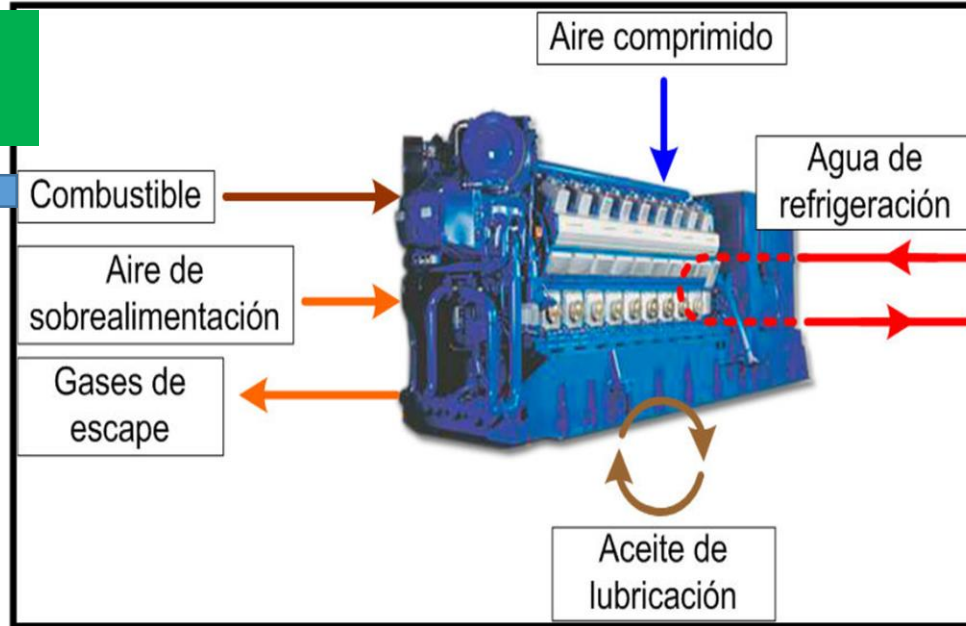
SISTEMA DE GENERACIÓN

Sistemas auxiliares de generación



- (1) Bombas de alimentación
- (2) Calentadores
- (3) Válvulas de tres vías
- (4) Separadores
- (5) Entrada de combustible sin tratar
- (6) Salida de combustible tratado
- (7) Retorno de combustible sin tratar

HFO
LFO



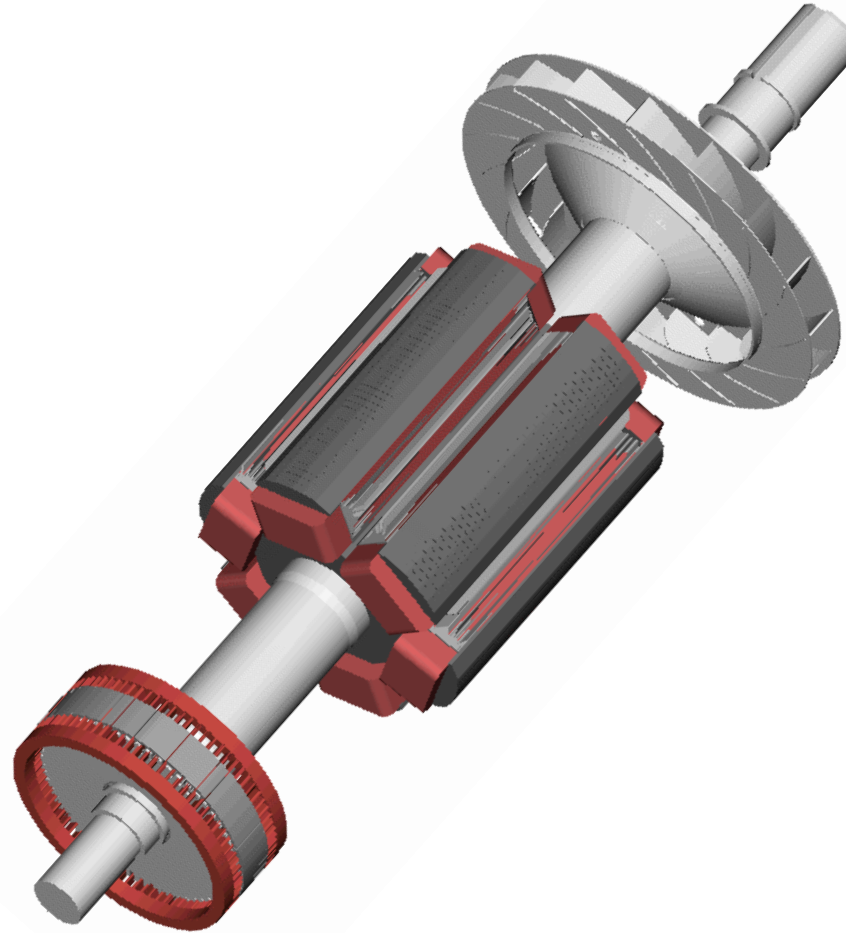
AIRE DE SOBRE
ALIMENTACIÓN



SISTEMA DE GENERACIÓN

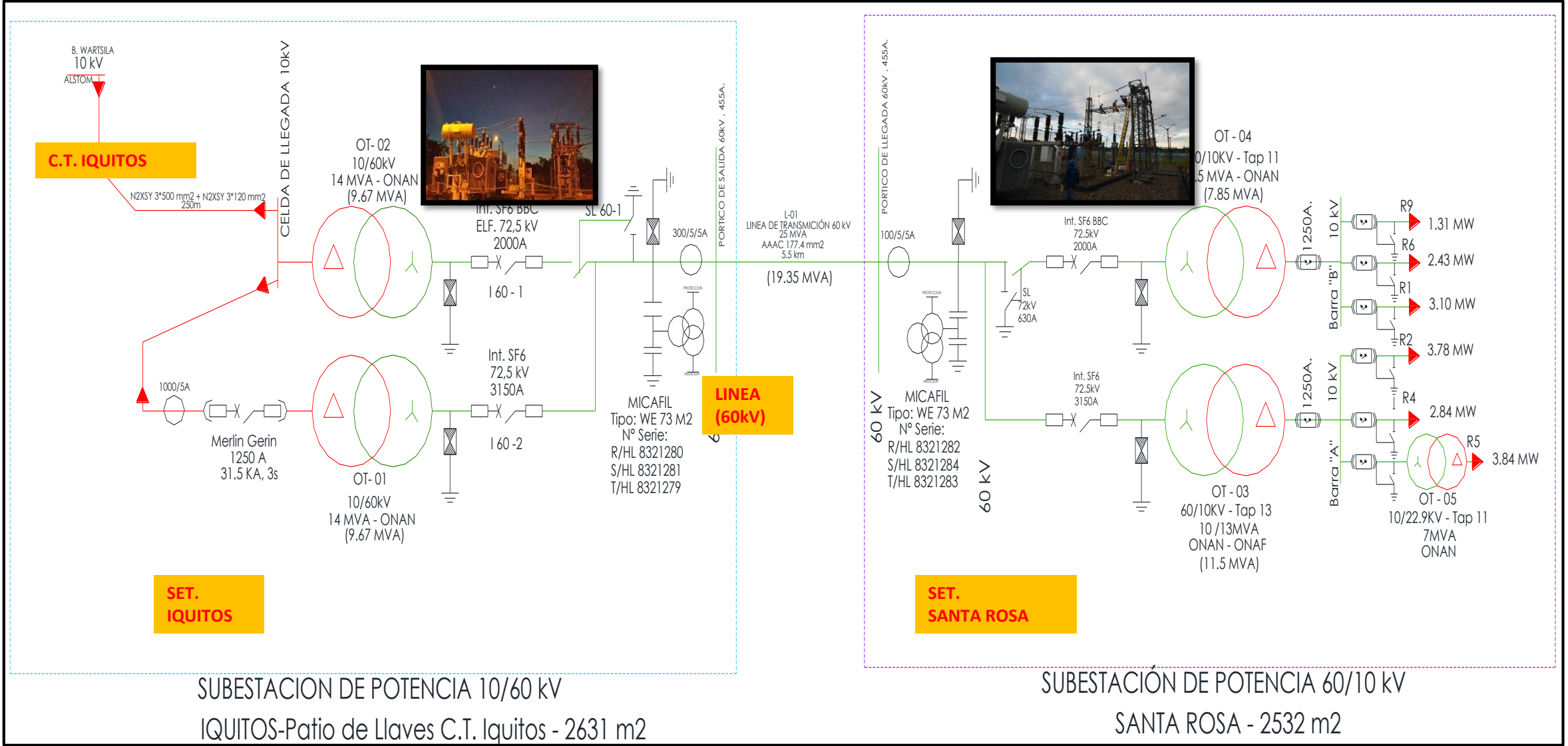
Generador eléctrico

- El rotor consta de:
 - Eje
 - Hecho de acero forjado.
 - Enlace
 - Varas
 - Hechas de acero laminado y ajustadas con pernos al enlace.
- Todas las bobinas están a presión de vacío e impregnadas con resina epoxy de alta calidad.



Localidades que abastece	Sector Típico	N° de clientes	Central eléctrica	Grupo generador		Potencia		
				Nombre		Estado	Instalada (KW)	Efectiva (KW)
Iquitos, Punchana, Belén y San Juan	2	79658	C.T. Iquitos	CAT - Mak 1		Inoperativo	7270	0
				CAT - Mak 2	Operativo		7270	7000
				CAT - Mak 5	Mtto		7400	0
				Wartsila 1	Operativo		6400	5500
				Wartsila 2	Operativo		6400	5500
				Wartsila 3	Operativo		6400	5500
				Wartsila 4	Operativo		6400	5500
				Wartsila 5	Operativo		8100	7850
				Wartsila 6	Operativo		8100	7850
				Emd - Gm 1	Operativo		2500	1000
				Emd - Gm 2	Baja		0	0
				Cummins 1	Operativo		2000	1500
				CAT3516B - 4	Operativo		2000	1300
				CAT3516B - 5	Operativo		2000	1300
				CAT3516B - 6	Inoperativo		2000	0
				CAT 3516 - 1	Operativo		2000	1400
				CAT 3516 - 2	Operativo		2000	1400
				CAT 3516 - 3	Operativo		2000	1200
				CAT 3512 - 1	Operativo		1360	1000
				CAT 3512 - 2	Operativo		1360	1000
				CAT 3512 - 3	Operativo		1360	1000
TOTAL						92420	64650	
(*) Máxima demanda registrada en noviembre 2014				Máxima demanda (KW)				53476
				Máxima demanda (KW)				53476

Sistema de Transmisión

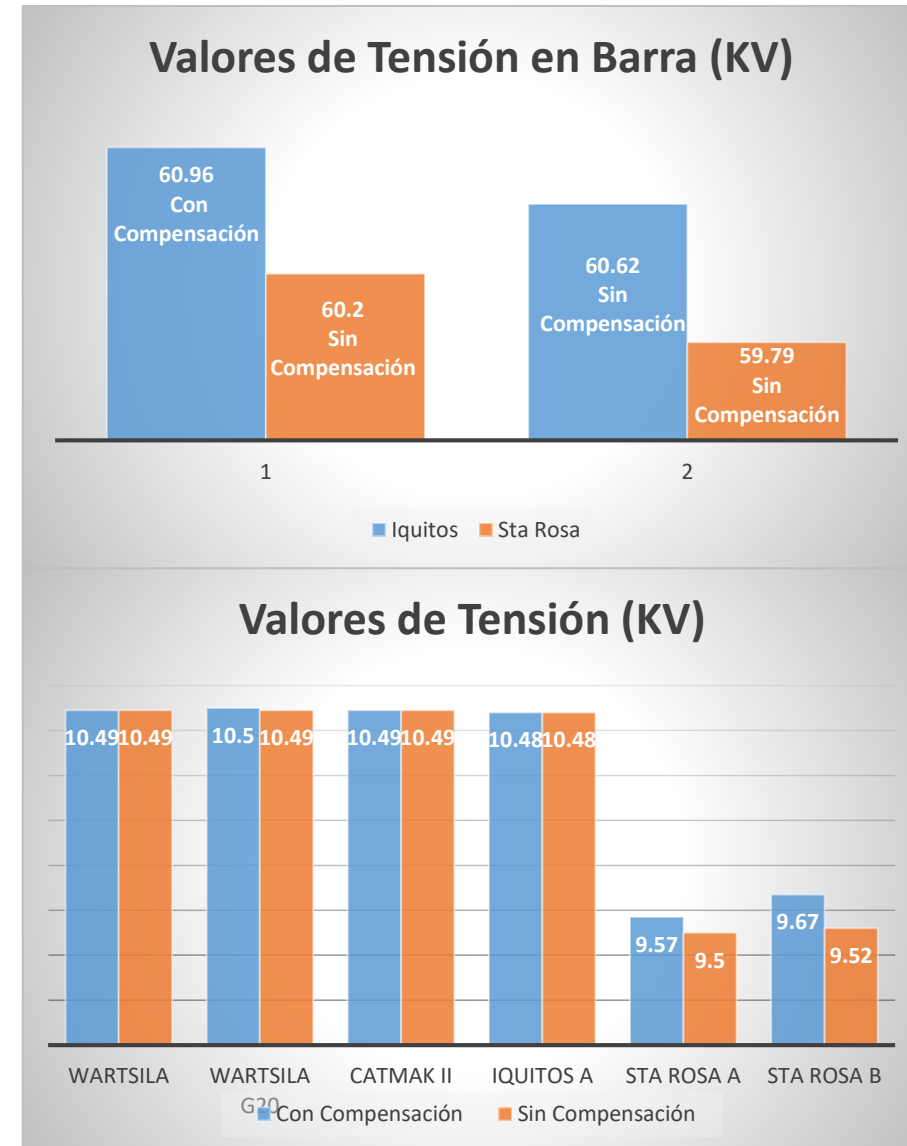


Análisis de flujos – Máxima demanda

Barras del sistema

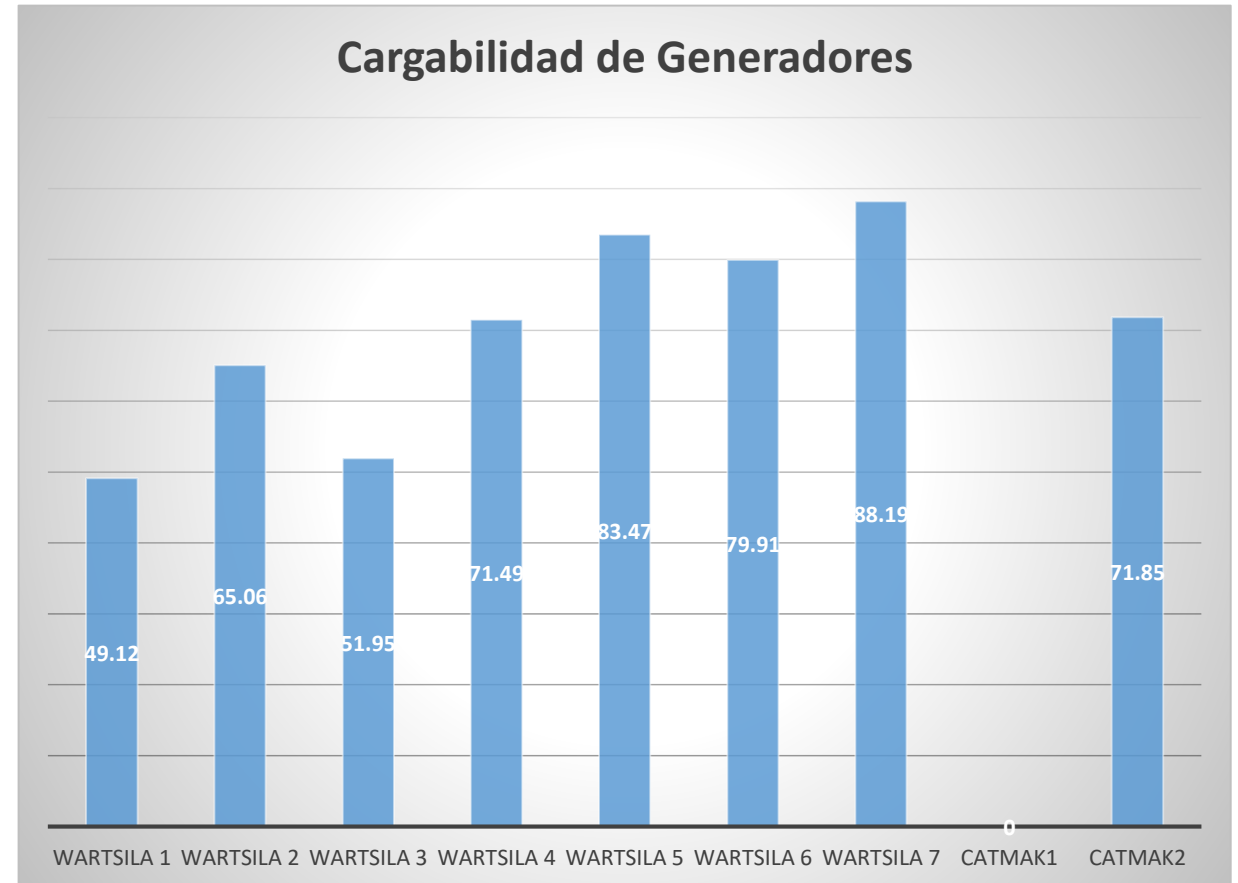
Se observa que los perfiles de tensión caen hasta 59.79 KV en la subestación de Santa Rosa, mientras que en la subestación de Iquitos cae a 60.6 KV, conectando el banco de capacitores los perfiles mejoran levemente, en la subestación Santa Rosa mejora hasta 60.2 kV y en la subestación Iquitos hasta 60.96 KV.

Caso diferente sucede en las barras de Santa Rosa A y Santa Rosa B, ya que al estar regulados mediante compensación reactiva se tienen perfiles de 9.57 KV y 9.67 KV respectivamente, claramente transgrediendo lo establecido en la norma técnica de calidad de los servicios eléctricos.



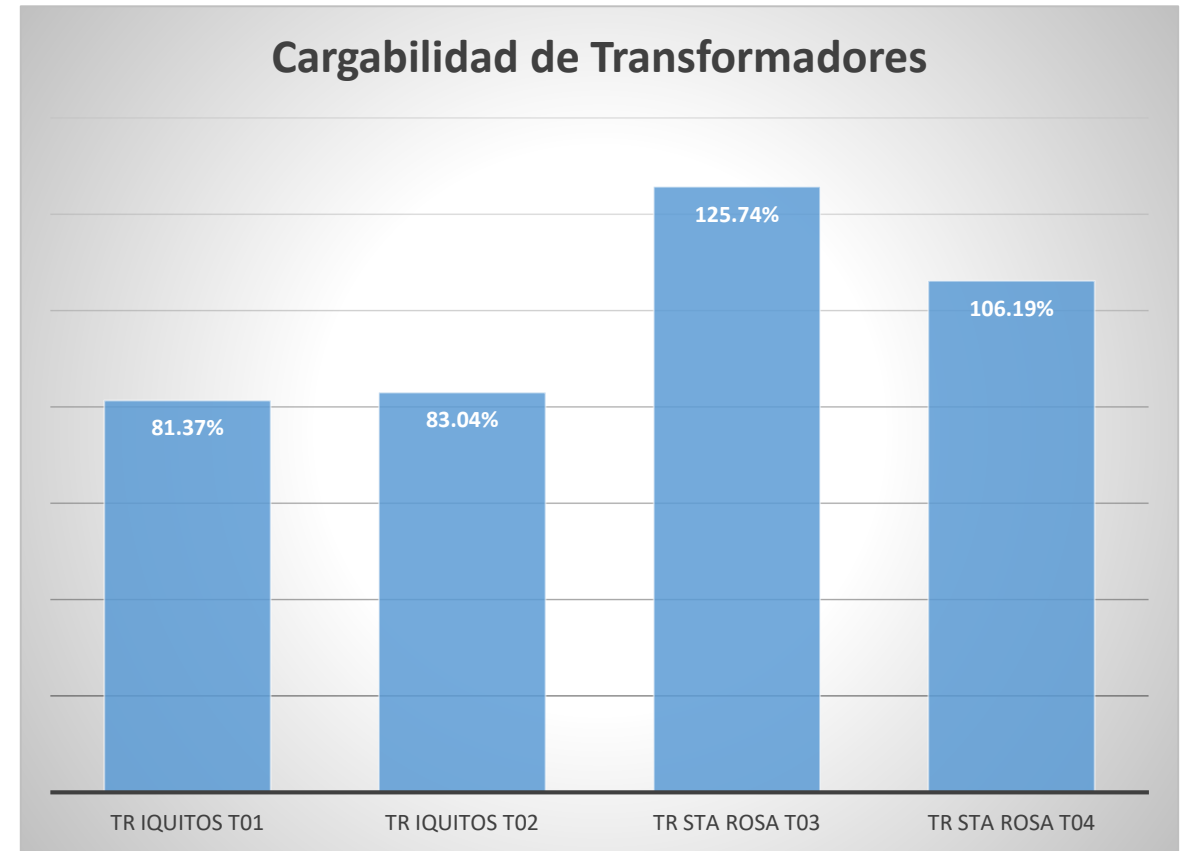
Generadores

Los generadores no presentan problemas de sobre carga, la máxima cargabilidad en este caso es para el generador wartsila 7 con 88,19%, los generadores de emergencia para este caso operan todos, debido a la exigencia de la demanda



Transformadores

los transformadores de la subestación Iquitos, se encuentran alrededor de 80% de cargabilidad, mientras que los transformadores de la subestación Santa Rosa barra A con 125% de cargabilidad y el transformador de la barra B en 106.19% de cargabilidad.



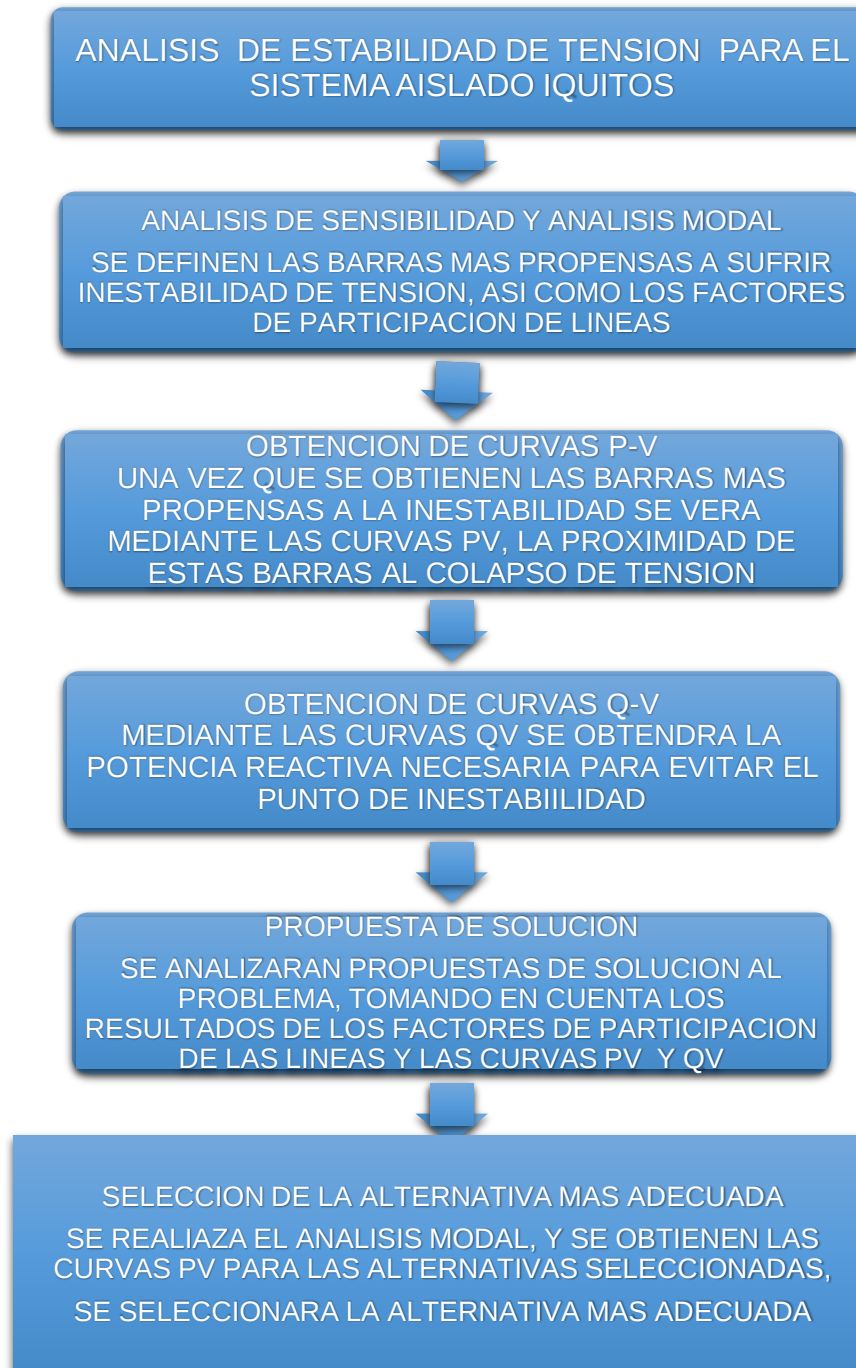
Línea de Transmisión

la línea lleva una potencia de 21.16 MW, y tiene una cargabilidad de 51.95%, este valor indica que la línea está operando a la mitad de su capacidad de carga y esta en condiciones normales de operación

Línea		Bus1	Bus2	Media		
Nombre	Equipo			MW	MVAr	Loading
L7	Línea 60kV	Iquitos	StaRosa_B	21.16	9.72	51.95%



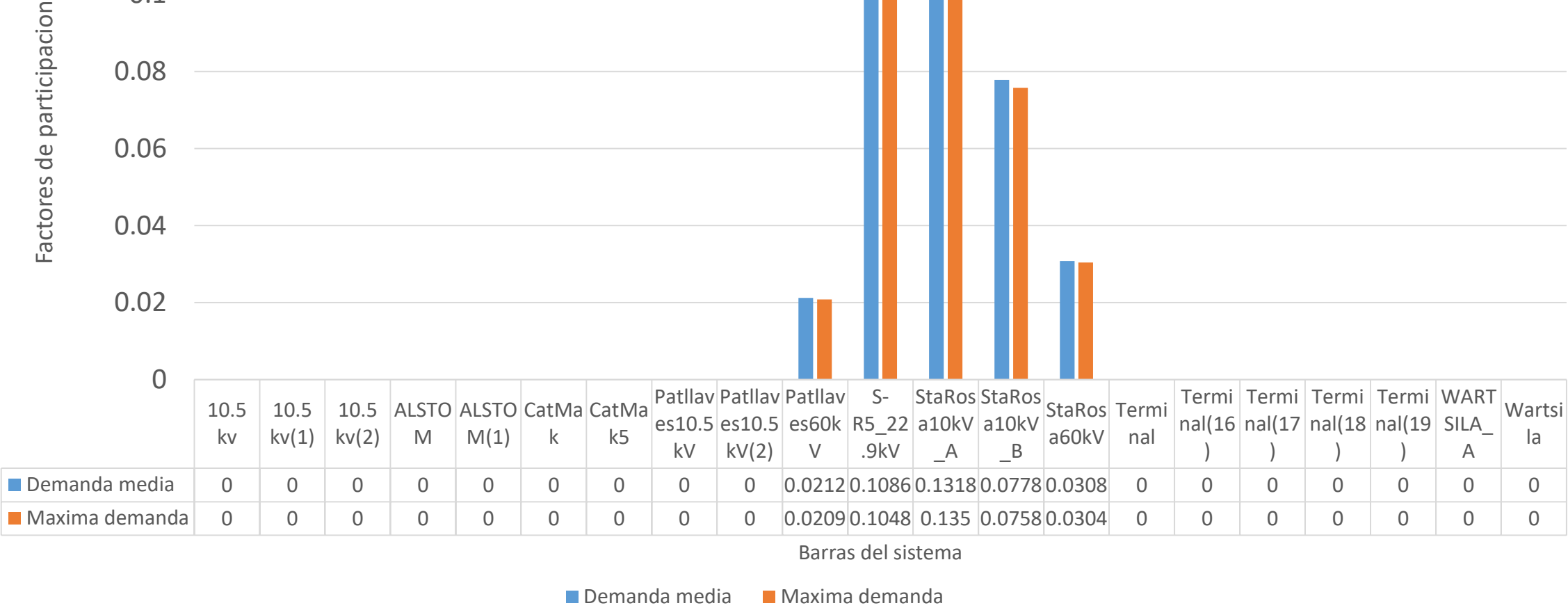
ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TENSION



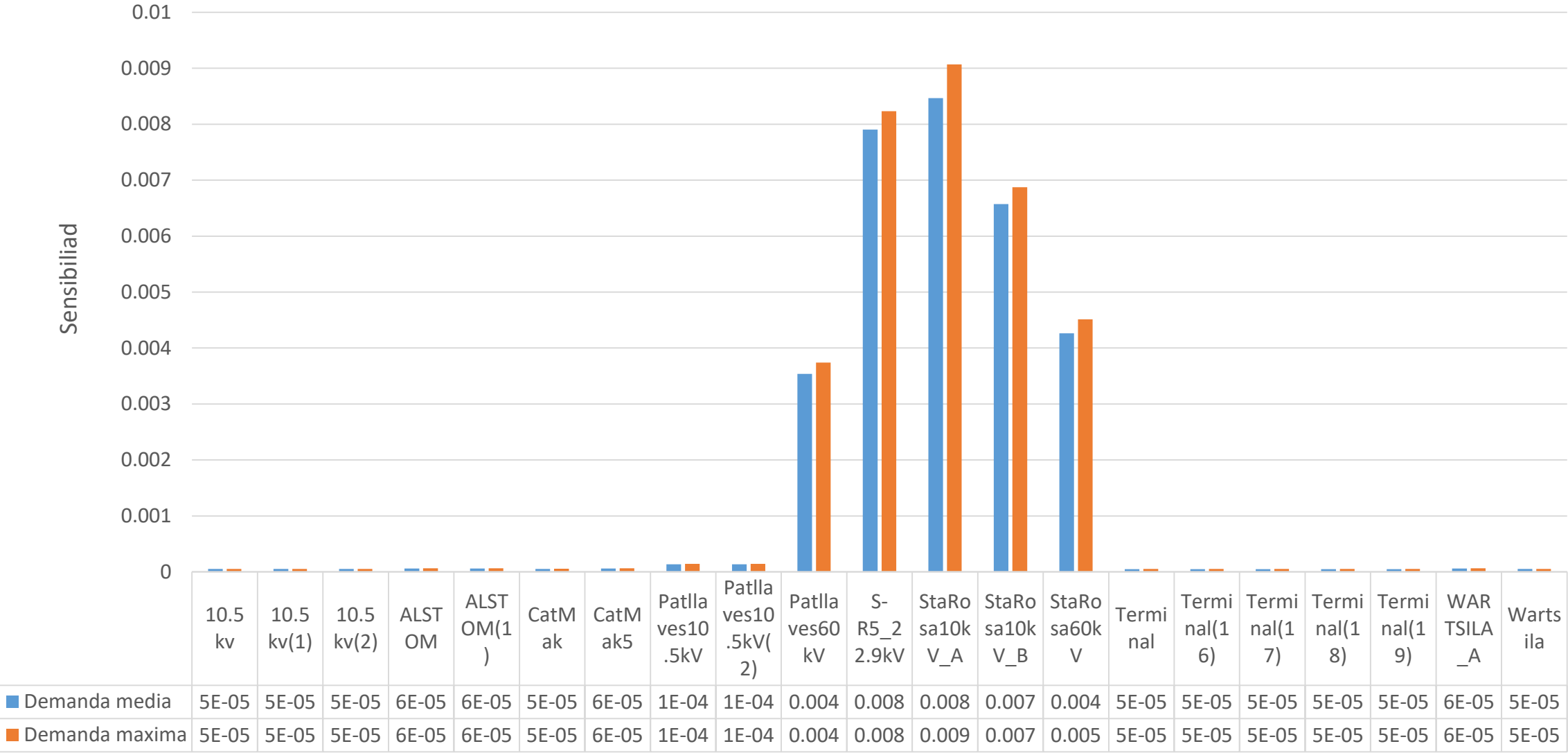
$$\partial v_i = \lambda_i \partial q_i$$

Ramas	Media demanda	Máxima demanda
λ_1	0.07589	0.0803
λ_2	0.03997	0.03997
λ_3	0.03365	0.03498
λ_4	0.01884	0.01868

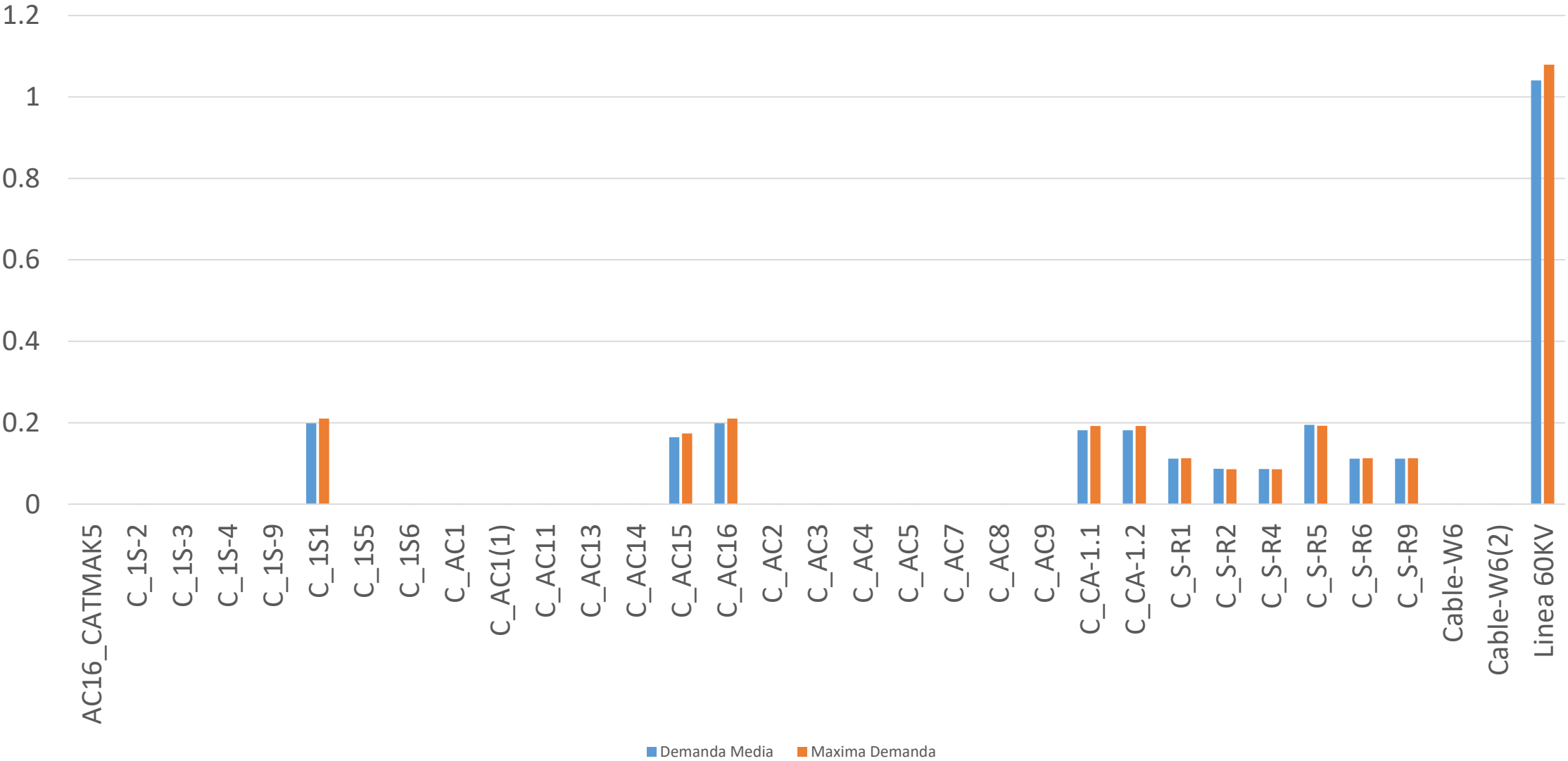
Factores de participacion para diferentes escenarios

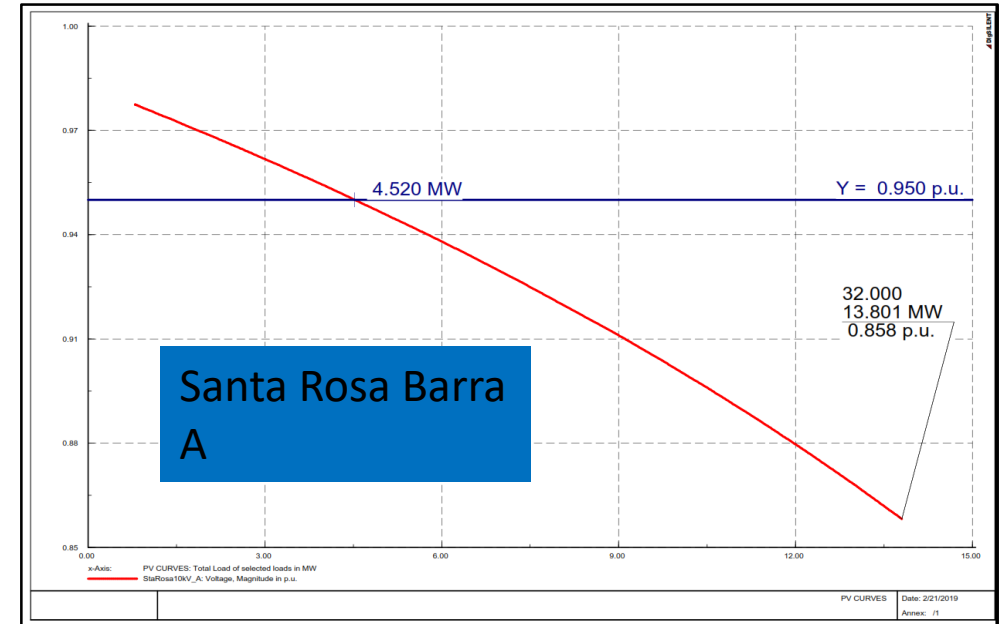
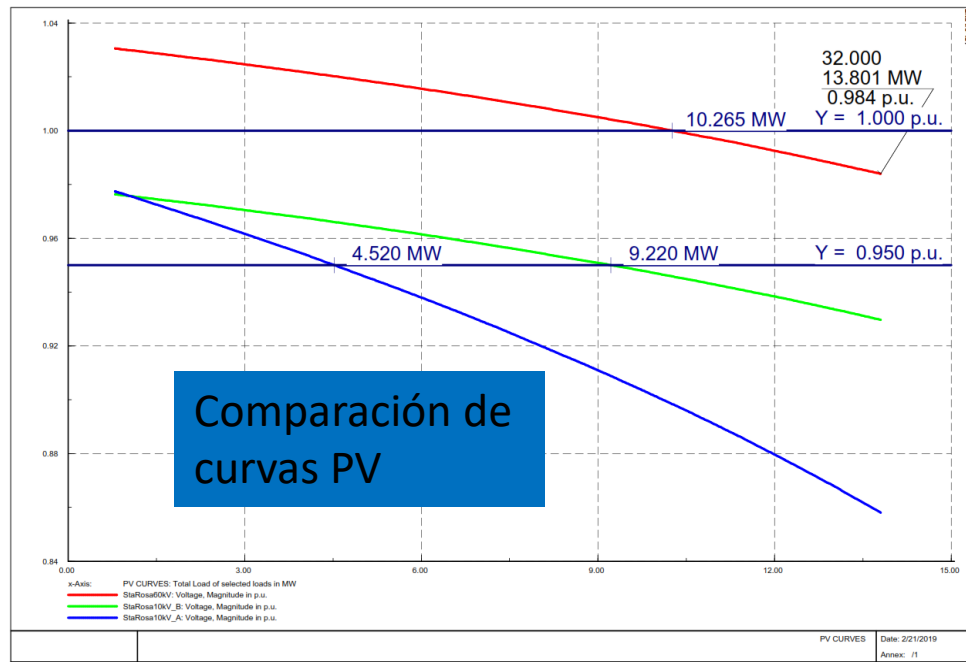


Sensibilidades en las barras

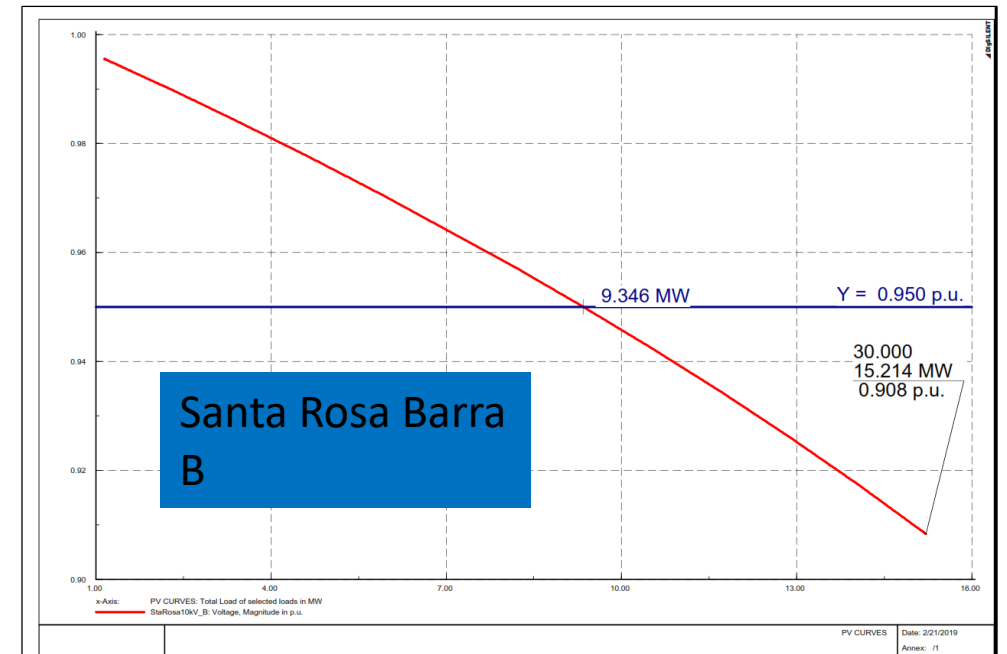
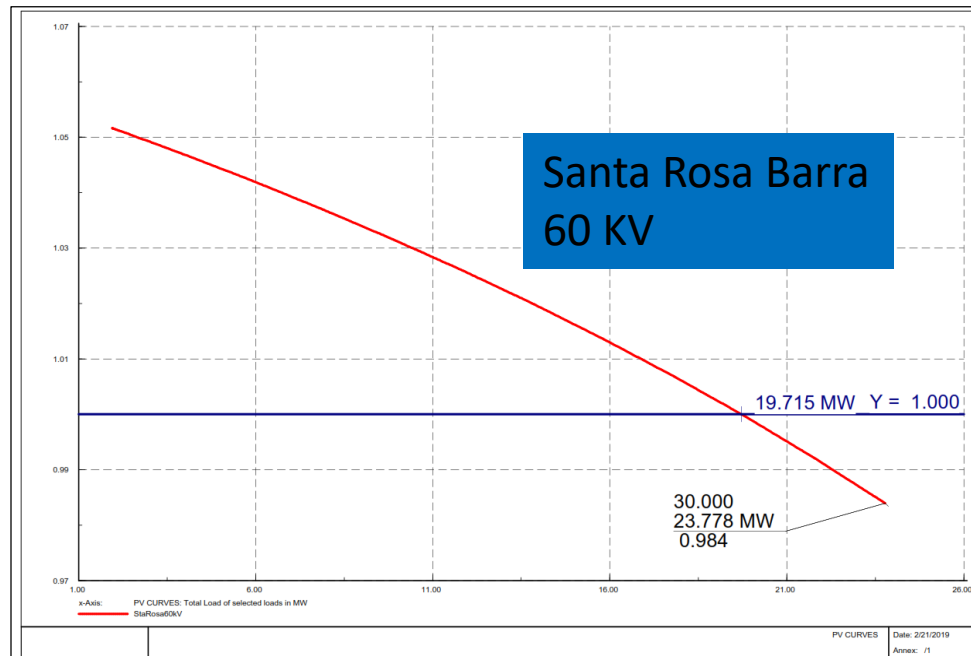


Factores de participacion de las ramas

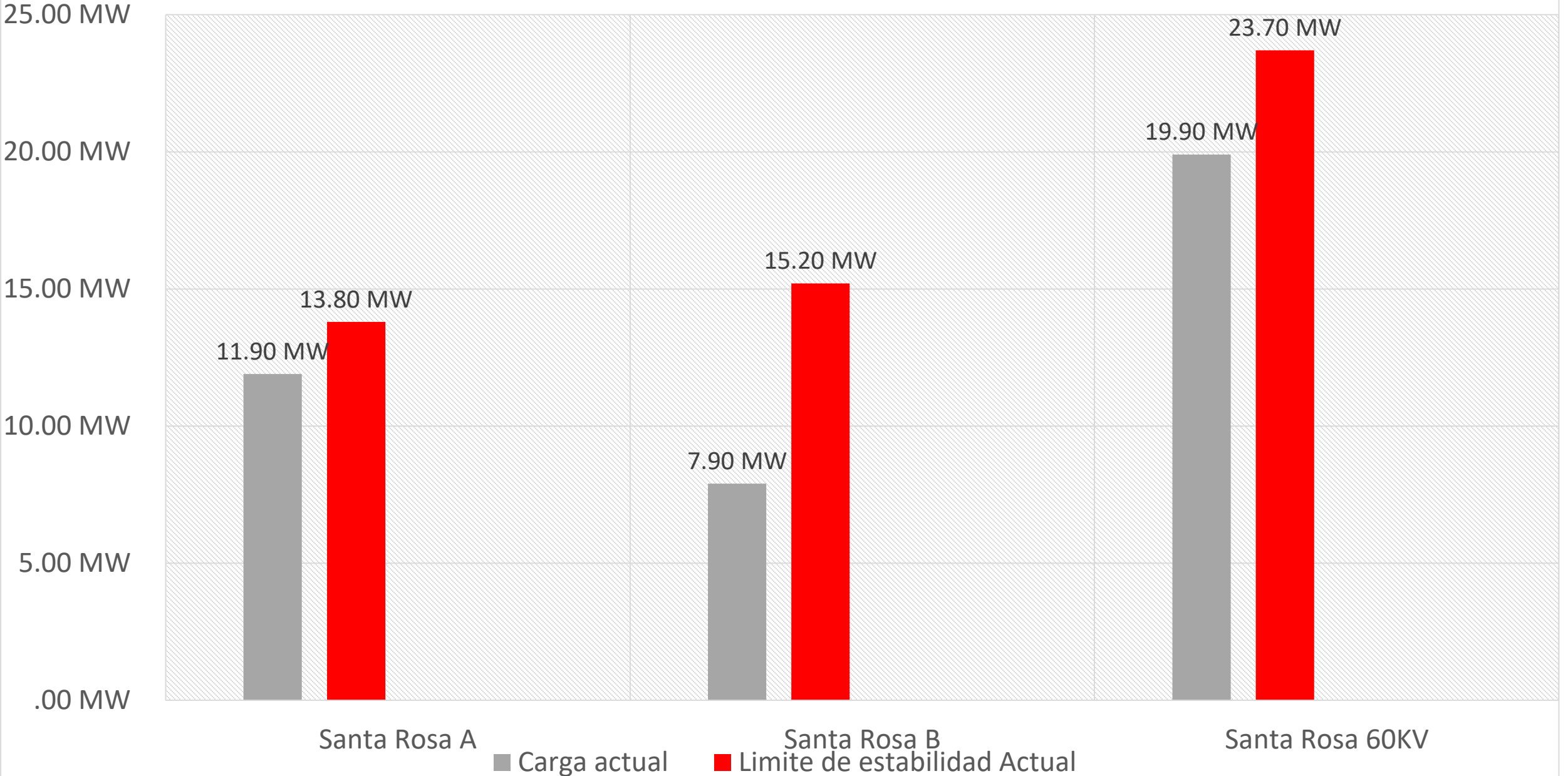




Curvas PV

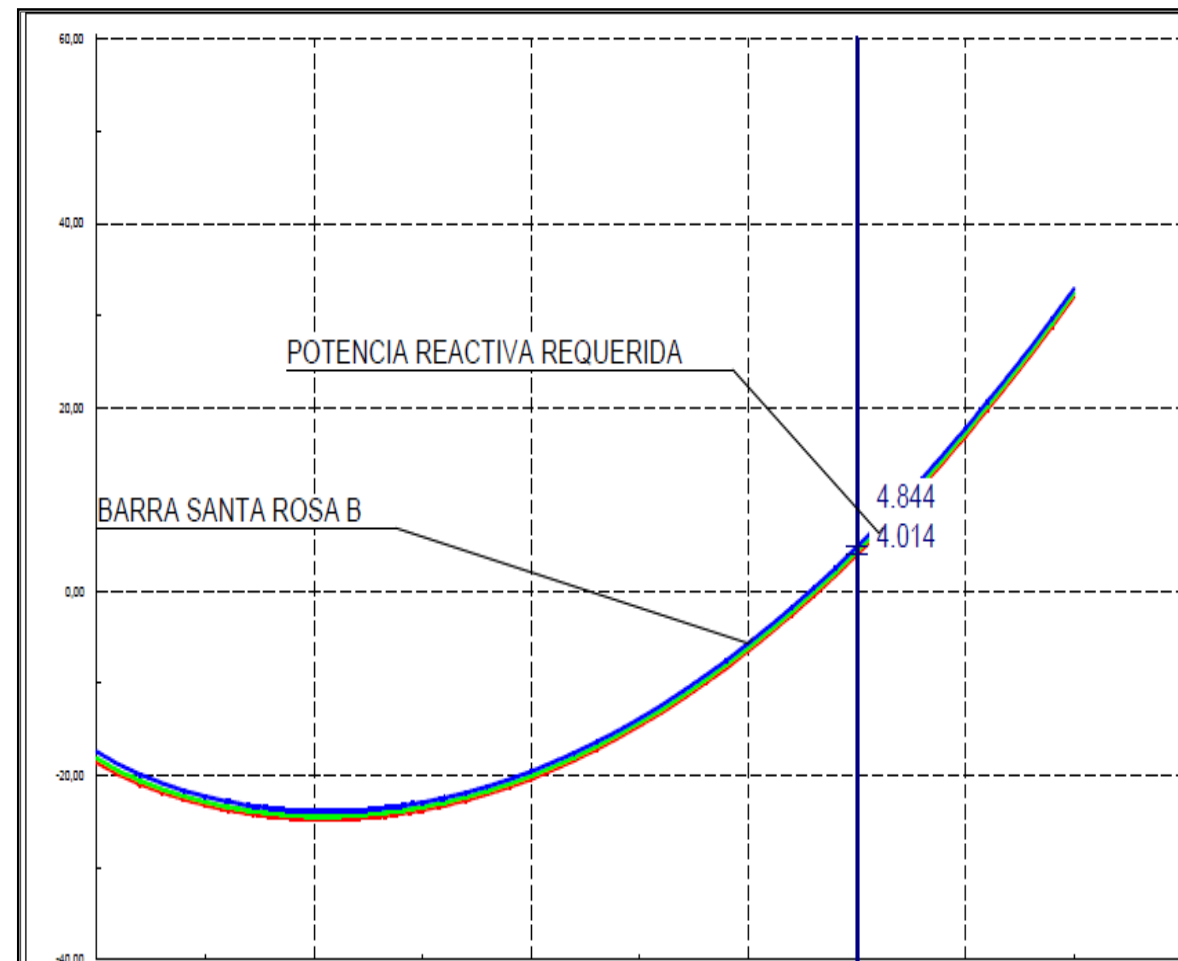
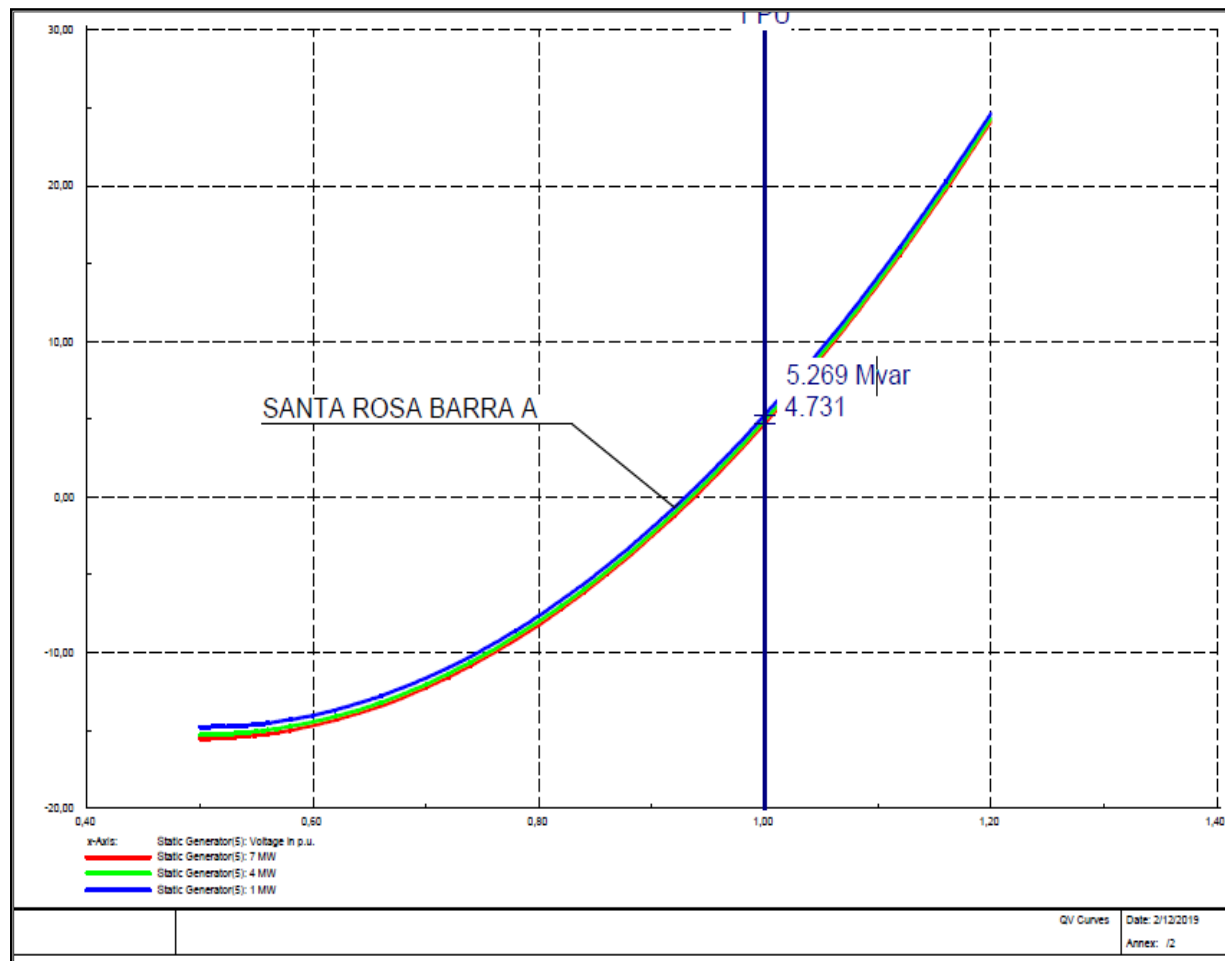


Demanda Actual y limite de estabilidad



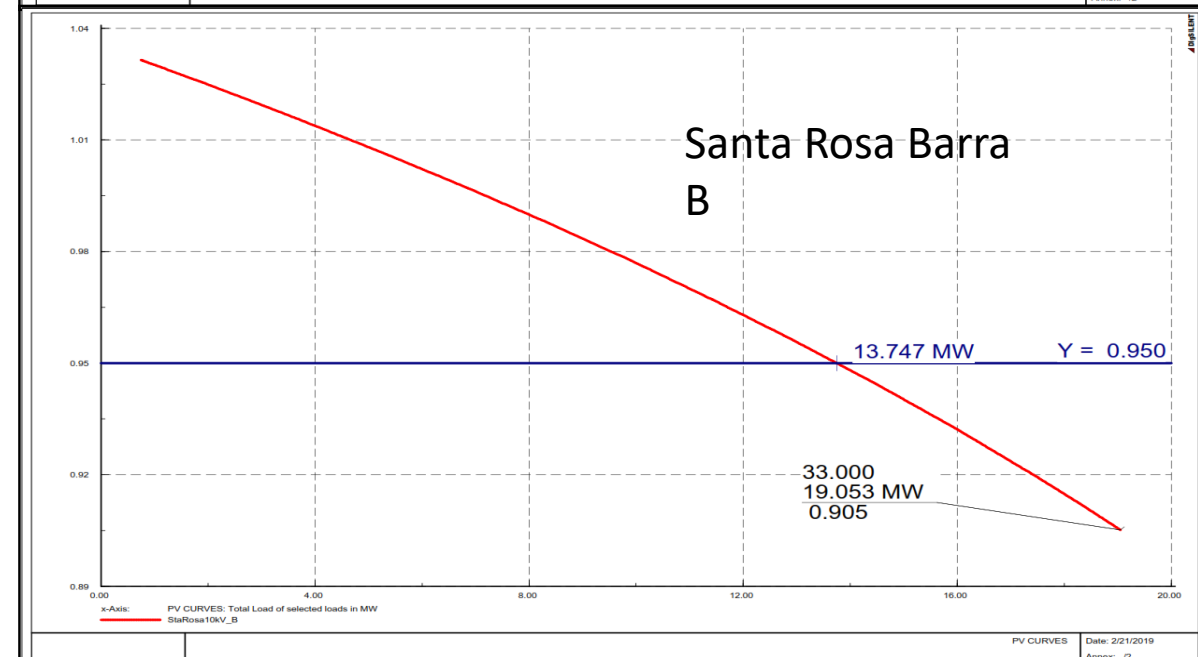
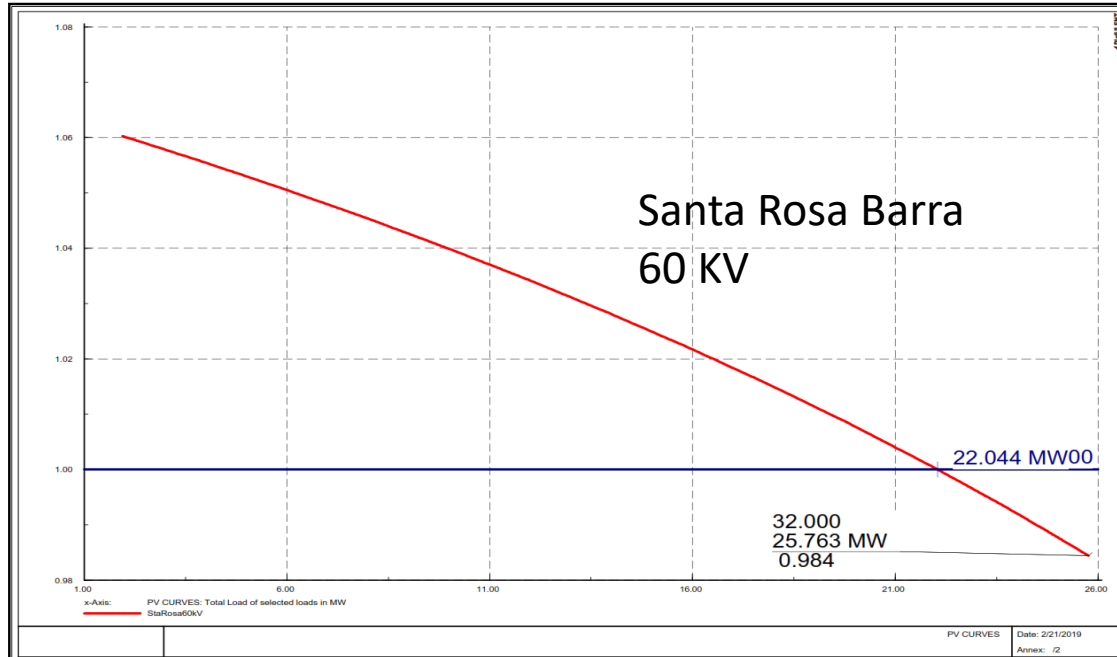
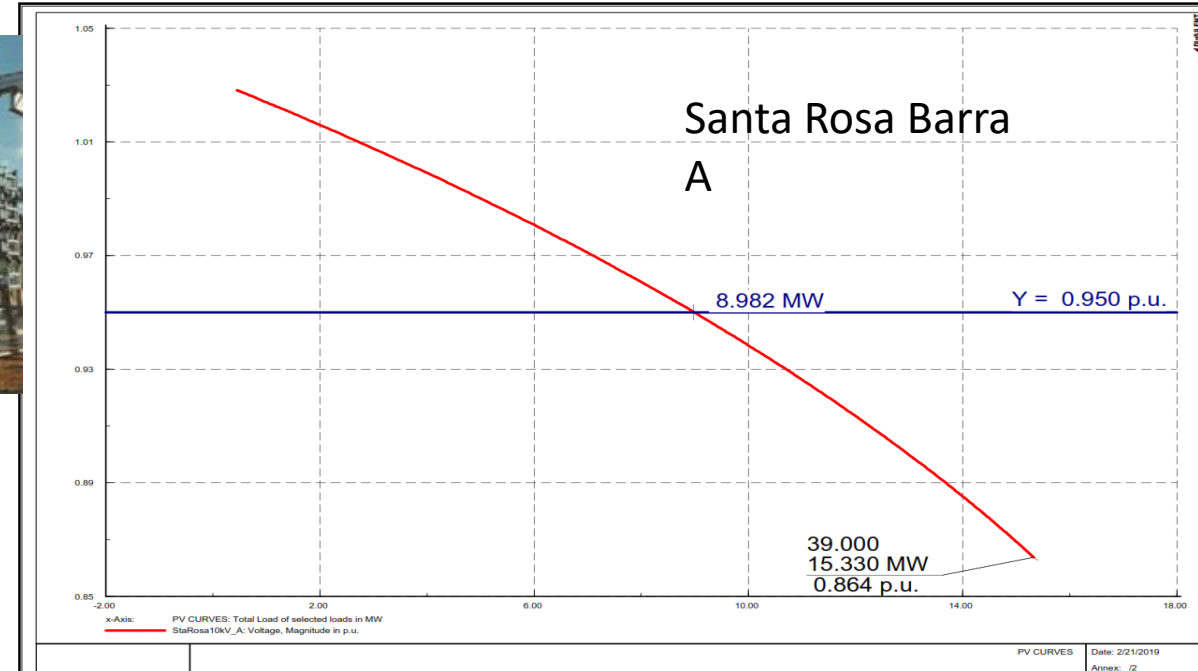
Alternativa 1

Análisis de curvas QV

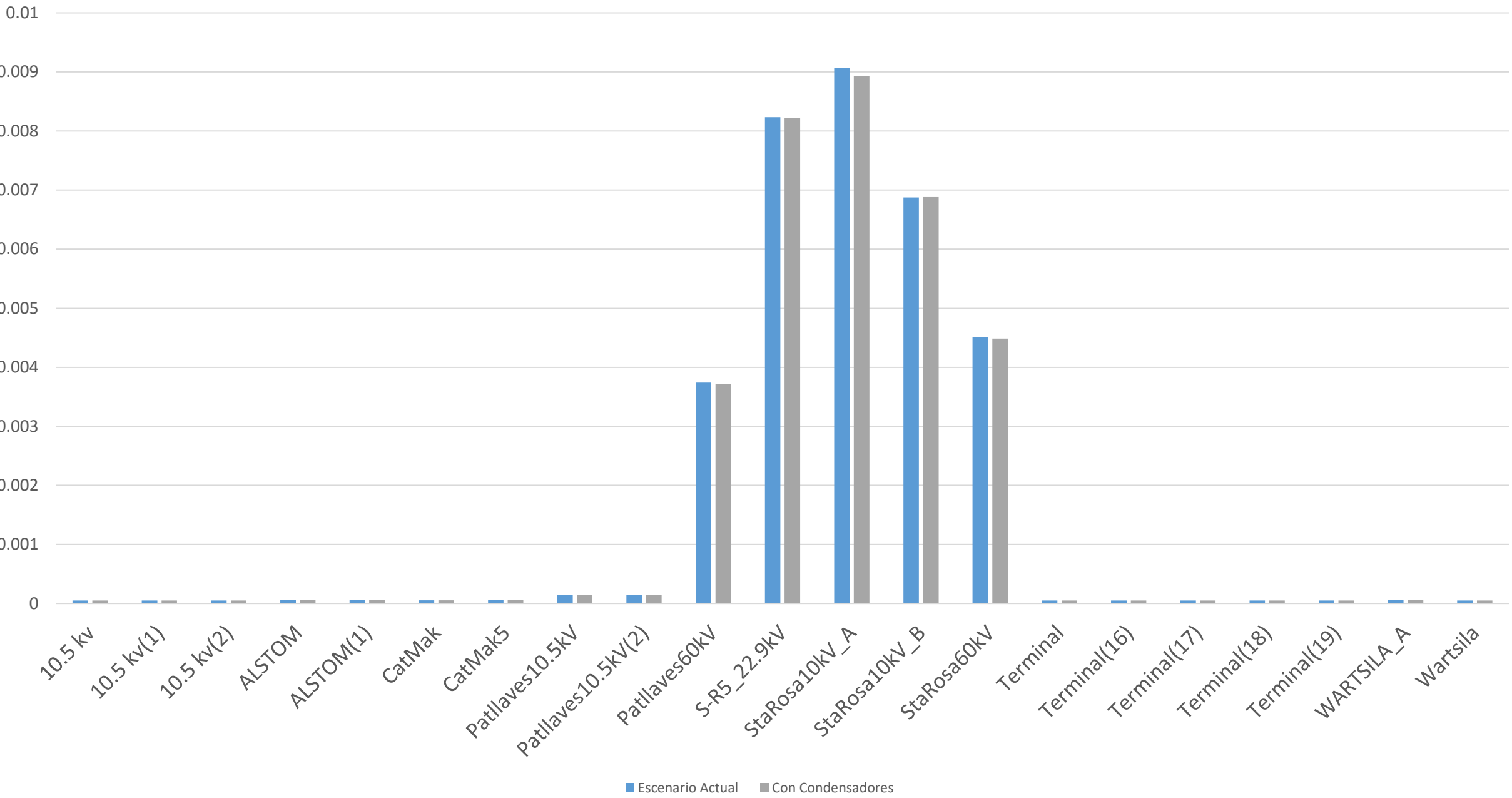


ANÁLISIS DE CURVAS PV, CON INSERCIÓN DE COMPENSACIÓN REACTIVA PROPUESTA

- Regulación: Regulación por pasos.
- Tipo de instalación: Exterior.
- Corriente de cortocircuito: 8KA.
- Tensión de operación: 10.5 KV.
- Frecuencia de operación: 60 Hz.
- Temperatura ambiente de operación: 15 a 40°C.
- Altitud de operación: 100 msnm, con presencia de fuertes lluvias y descargas atmosféricas.
- Humedad relativa máxima: 85%.

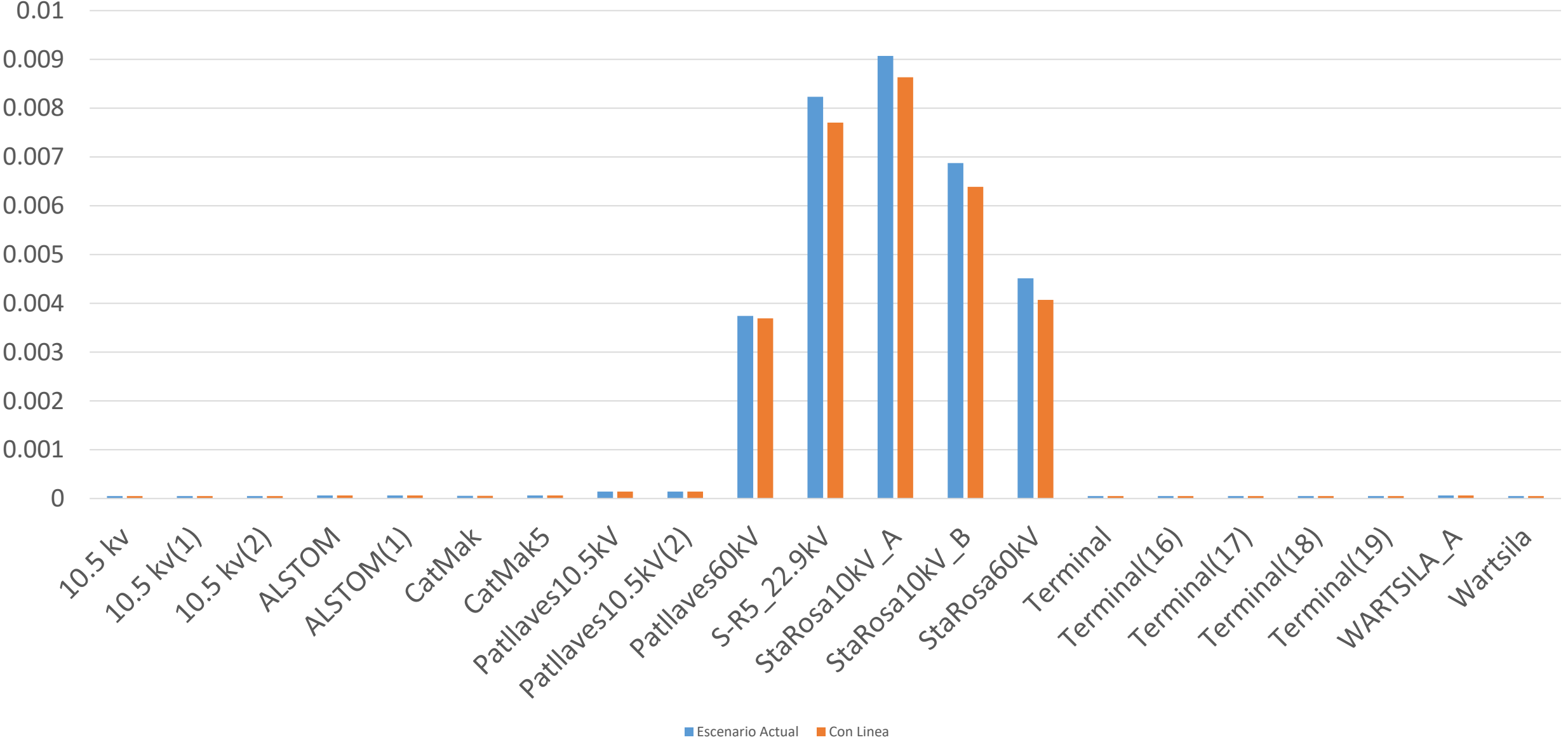


Sensibilidades escenario actual y con compensacion reactiva



Alternativa 2

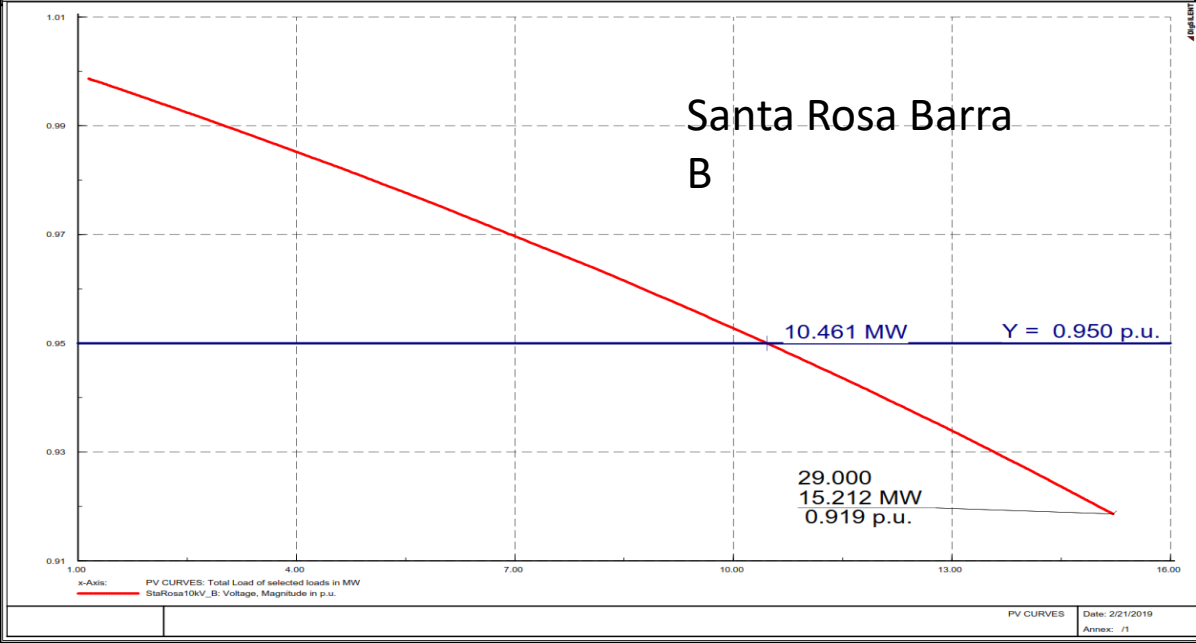
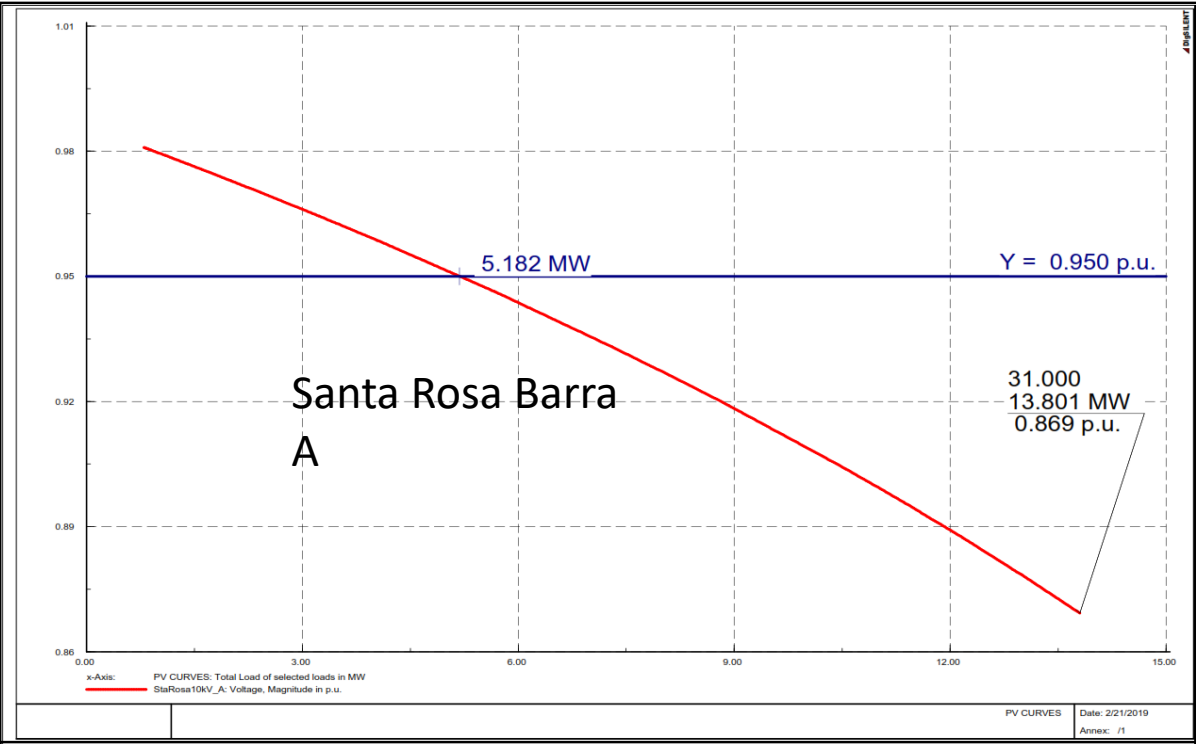
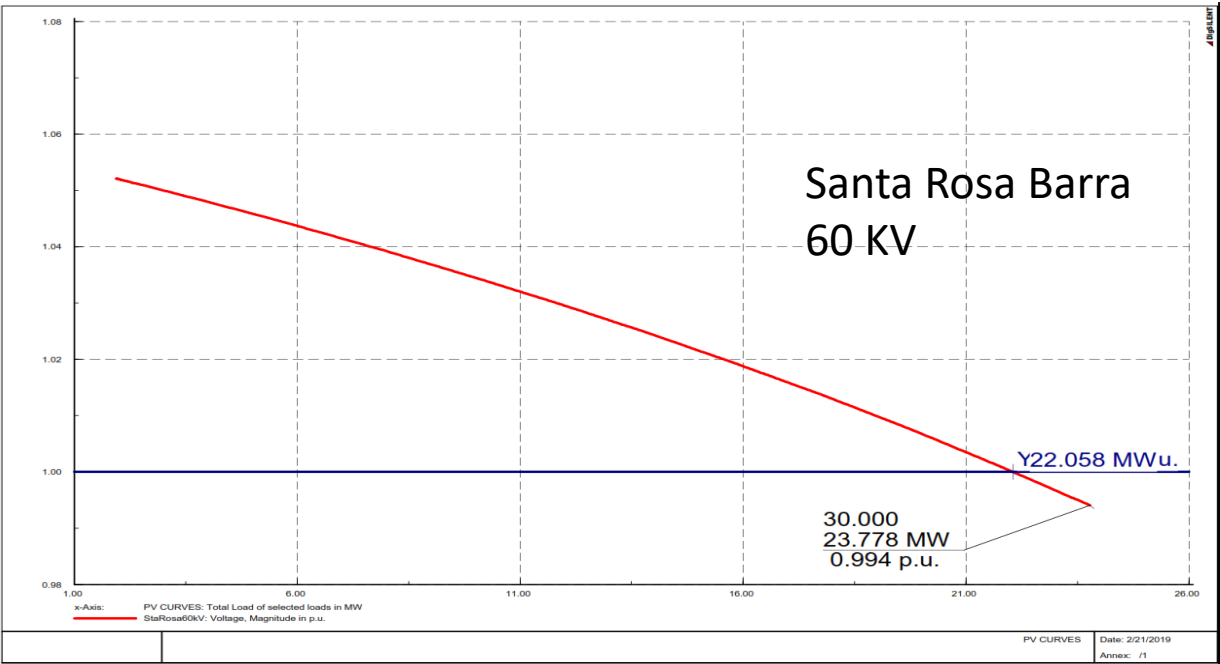
Sensibilidades escenario actual y con reforzamiento de linea



Análisis de curvas PV, con reforzamiento de Línea

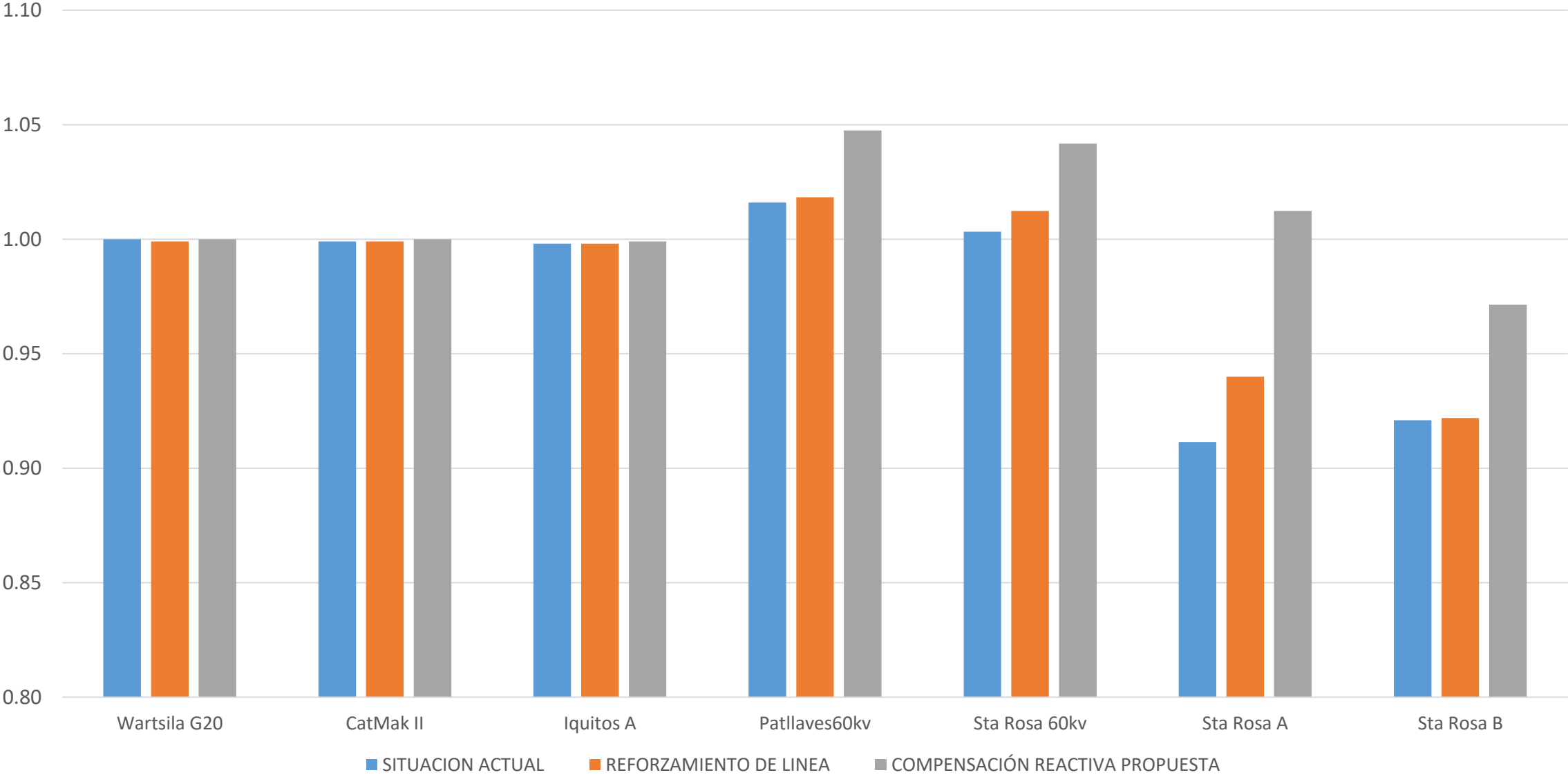
- Inom: 0.425 KA.
- Z1: 2.67 Ohm.
- R1: 1.046 Ohm.
- X1: 2.462.
- R0: 2.405 Ohm.
- X0: 7.403 Ohm

LÍNEA	Material	Sección (mm2)	Diámetro del cable (mm)	Nº de hilos	Peso (kg / m)
L-01	ACSR	78.6	11.35	6	0.273

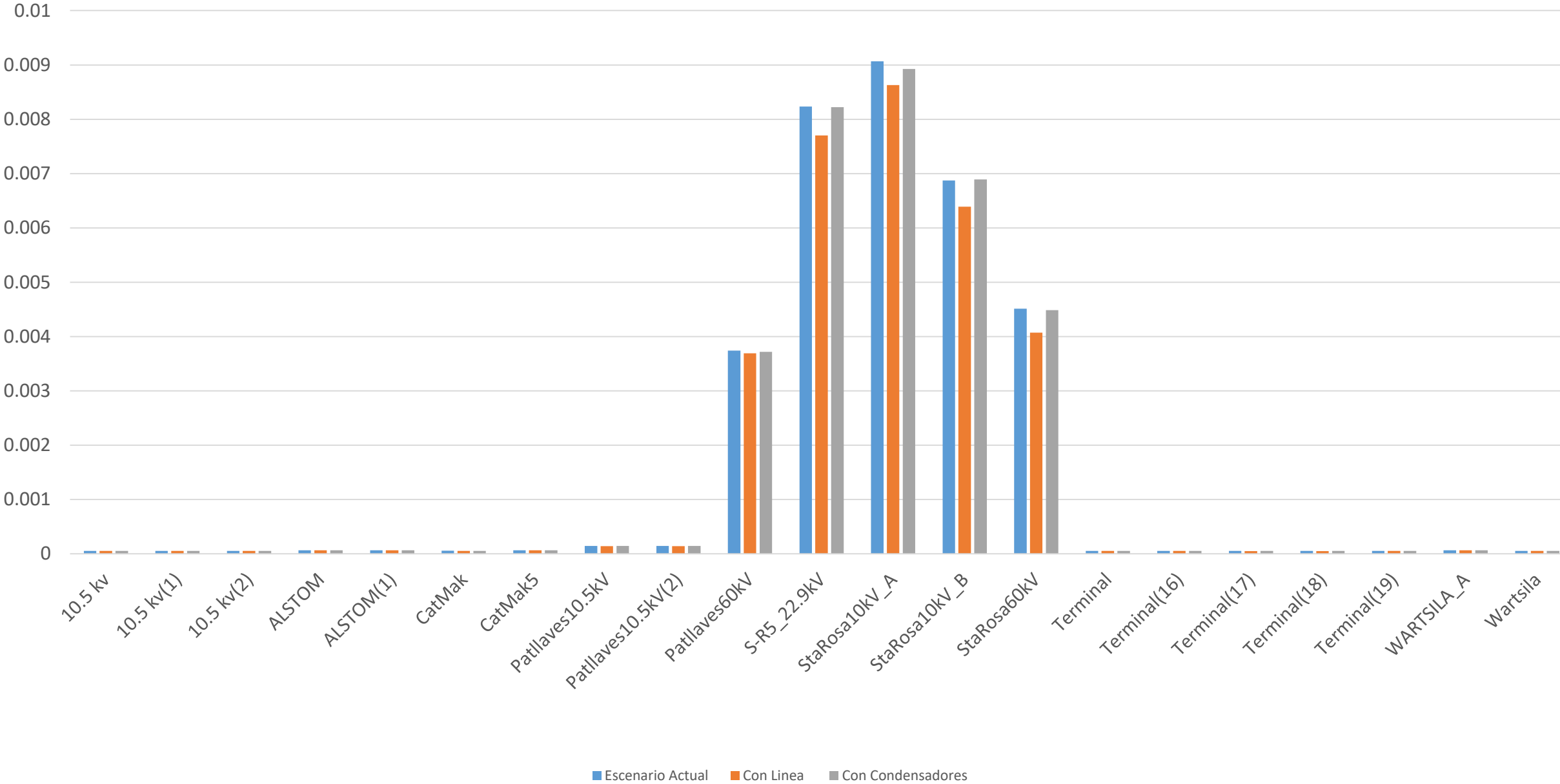


Comparación y selección de la mejor
alternativa

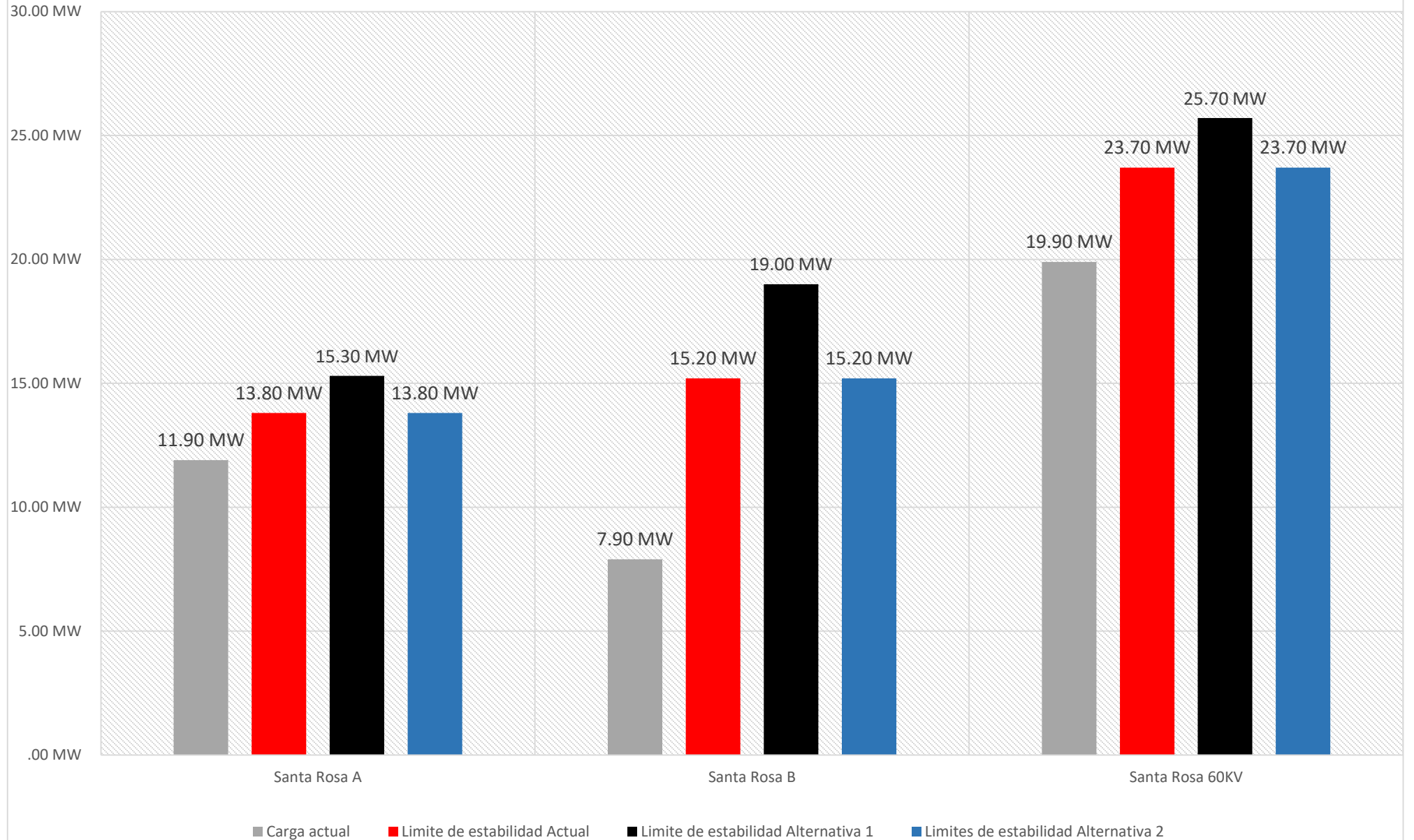
Comparacion de tensiones para las dos altenativas



Comparacion de sensibilidades en las barras



Comparacion de los limites de estabilidad



CONCLUSIONES

En esta tesis se estudió la estabilidad de tensión en el sistema eléctrico aislado Iquitos, se propusieron medidas que mejoren la estabilidad de tensión, se analizaron las propuestas y se seleccionó la alternativa técnica más adecuada de acuerdo a las siguientes etapas.

1. Se diagnosticaron las condiciones de operación actual en estado estacionario, con los flujos de potencia en máxima demanda se demostró que existen problemas de tensión en las barras Santa Rosa A que posee valores de tensión de aproximadamente 0.91 p.u. y en la barra Santa Rosa B de 0.92 p.u. Para este escenario los generadores no presentan problemas de sobrecarga, sin embargo los transformadores de la barra Rosa A y Santa Rosa B se encuentran sobrecargados en 125.74% y 106.19% respectivamente.

La cargabilidad de la línea para el escenario de máxima demanda es de 51.95%, lo cual muestra que la línea de transmisión solo usa la mitad de su capacidad de transmisión.

La compensación reactiva existente en la barra Santa Rosa B de 1.8 MVAR resulta insuficiente para mejorar las tensiones en las barras de la subestación Santa Rosa.

2. Se determinaron los elementos más sensibles del sistema; usando el método del análisis modal se demostró que la rama con mayor factor de participación es la línea de transmisión de 60KV, aunque esta línea no presenta sobrecarga contribuye a la inestabilidad de tensión.

Las barras más inestables son las barras Santa Rosa A, Santa Rosa B y Santa Rosa 60 KV, todas ubicadas en la zona sur de la ciudad. Haciendo uso de las curvas PV determinó que **Santa Rosa A solo tiene un margen de 1.9 MW antes de llegar al punto de colapso, la barra Santa Rosa B tiene un margen de 7.3 MW y la barra Santa Rosa 60KV tiene un margen de 3.8 MW.**

3. Se analizaron dos alternativas para mejorar la estabilidad de tensión del sistema:

La alternativa 1 consiste en la incorporación de bancos de condensadores de 5MVAR en las barras Santa Rosa A y Santa Rosa B con lo que **se consiguió incrementar el límite de estabilidad de tensión de las tres barras, dándole un margen de 3.4 MW a la barra Santa Rosa A, un margen de 11.1 MW en la barra Santa Rosa B y un margen de 5.1 MW en la barra Santa Rosa 60 KV.**

La alternativa 2 consiste en el reforzamiento de la línea de transmisión de 60 KV, con una segunda terna, con lo que se consiguió incrementar significativamente la sensibilidad en las barras, mas no las tensiones ni los límites de estabilidad.

Después de analizar ambas alternativas se concluyó que la mejor alternativa técnica para mejorar la estabilidad de tensión es: **La alternativa 1, incorporación de bancos de condensadores de 5 MVAR en las barras Santa Rosa A y Santa Rosa B.**