

## **2 ESQUEMA DE ALIVIO DE CARGA POR INESTABILIDAD DE VOLTAJE (EACIV) MEDIANTE MEDICIÓN DE LA RELACIÓN VOLTAJE – IMPEDANCIA**

Como se indicó en el capítulo 1, se plantea establecer un Índice de Estabilidad de Voltaje (IEV) sobre la base de la relación voltaje – impedancia que es posible obtenerla mediante el uso de dispositivos electrónicos inteligentes (IED's).

La propuesta de realizar una medición y análisis de impedancia para determinar la cercanía a un punto de operación de voltaje inestable, permite independizar la operación de los mecanismos de desconexión de ciertas variaciones de los sistemas que podrían de otra forma ser consideradas como condiciones inestables cuando en realidad no lo son.

### **2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA RELACIÓN VOLTAJE - IMPEDANCIA EN CONDICIONES DE INESTABILIDAD DE VOLTAJE**

En un SEP, existe una relación no lineal entre la potencia y el voltaje, que es más trascendente durante el desarrollo de un fenómeno de Inestabilidad de Voltaje.

Es posible establecer relaciones entre la cargabilidad y el voltaje, sobre la base de ecuaciones de flujo de potencia y mediciones de impedancia. El desarrollo planteado a continuación, permitirá establecer Índices que expresen la cercanía a una condición voltaje-inestable de operación, mediante estos parámetros.

#### **2.1.1 MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE - IMPEDANCIA “IEVZ”**

Para el siguiente análisis se considera el modelo de barra infinita - carga, indicado en la figura 2.1.

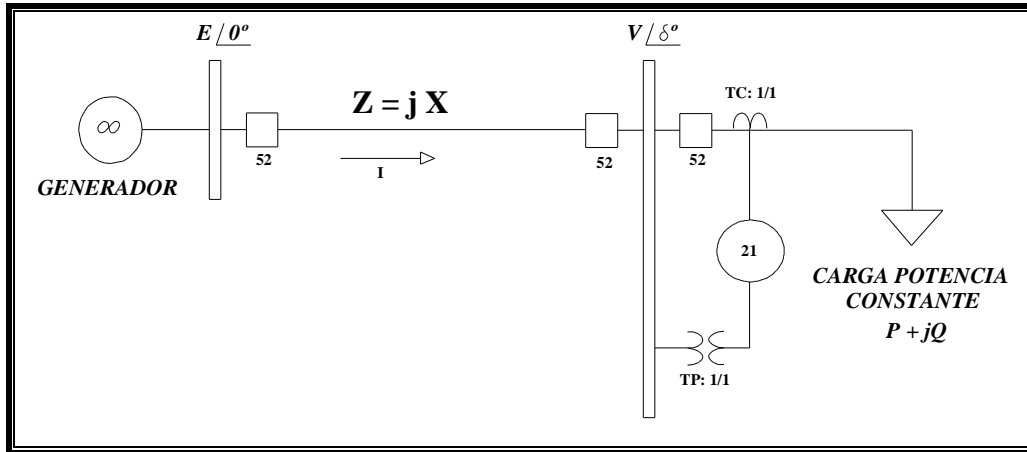


Figura 2. 1 Modelo de Barra Infinita - Carga

El esquema considera la carga mediante un modelo de potencia constante  $\alpha = \beta = 0$ . Posteriormente se analizarán los diversos modelos de carga existentes.

Considerando las restricciones dadas por el sistema de transmisión, y partiendo de la ecuación 1.3 de solución de flujo de carga, establecida ya en 1.4.1, se plantea el siguiente análisis.

$$P^2 + Q^2 + \frac{2QV^2}{X} + \left(\frac{V^2}{X}\right)^2 - \left(\frac{EV}{X}\right)^2 = 0$$

Sea  $S_{sc} = \frac{E^2}{X}$ , variable que corresponde a la potencia de cortocircuito en la barra de carga y que intrínsecamente tiene la dependencia de la solución del flujo de carga respecto a los datos del sistema, como topología de la red (variable X) y condiciones despacho de generación (variable E); se reescribe la ecuación 1.3.

$$P^2 + Q^2 + \frac{2QV^2}{X} + \left(\frac{V^2}{X}\right)^2 - \frac{S_{sc}V^2}{X} = 0$$

De donde:

$$S_{sc} = \frac{V^4 + 2QV^2 + (P^2 + Q^2)X^2}{XV^2} \quad (2.1)$$

Es decir que para un valor dado de V, P, Q y X, se establece el valor de E que permite la solución del flujo de potencia para los valores antes indicados.

Como se analizó en 1.4.1., existe solución en la ecuación 1.3 si y solo si:

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

Considerando el reemplazo  $S_{sc} = \frac{E^2}{X}$

$$\begin{aligned} -P^2 - S_{sc}Q + \left(\frac{S_{sc}}{2}\right)^2 &\geq 0 \\ \frac{-4P^2 - 4S_{sc}Q + S_{sc}^2}{4S_{sc}} &\geq 0 \quad (2.2) \end{aligned}$$

Si la ecuación 2.2 es igual a cero, el SEP se encuentra en el límite para el cual existe solo una solución. De la definición de la variable  $S_{sc}$ , ésta será siempre mayor a cero, por lo que:

$$-4P^2 - 4S_{sc}Q + S_{sc}^2 \geq 0$$

Reemplazando en esta última ecuación el valor de  $S_{sc}$  determinado en la ecuación 2.1, se tiene:

$$\frac{V^8 - 2(P^2 + Q^2)X^2V^4 + (P^2 + Q^2)^2X^4}{V^4X^2} \geq 0$$

El denominador de esta ecuación será mayor a cero, siempre que exista convergencia en el flujo de carga. Se tiene entonces:

$$V^8 - 2(P^2 + Q^2)X^2V^4 + (P^2 + Q^2)^2X^4 \geq 0 \quad (2.3)$$

Adicionalmente, y considerando la medición de la impedancia, determinada por ejemplo en un relé de distancia ubicado en el punto de la carga como se indicó en la figura 2.1, se tiene:

$$\mathbf{S} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{I}^* = \mathbf{V} \left( \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}} \right)^* = \frac{V^2}{\mathbf{Z}^*} \Rightarrow S = \frac{V^2}{|\mathbf{Z}^*|} = \frac{V^2}{Z} \quad (2.4)$$

Además,

$$\mathbf{S} = P + jQ \Rightarrow S^2 = P^2 + Q^2$$

Con lo que la ecuación 2.3, sería:

$$V^8 - 2S^2 X^2 V^4 + S^4 X^4 \geq 0$$

Reemplazando la ecuación 2.4

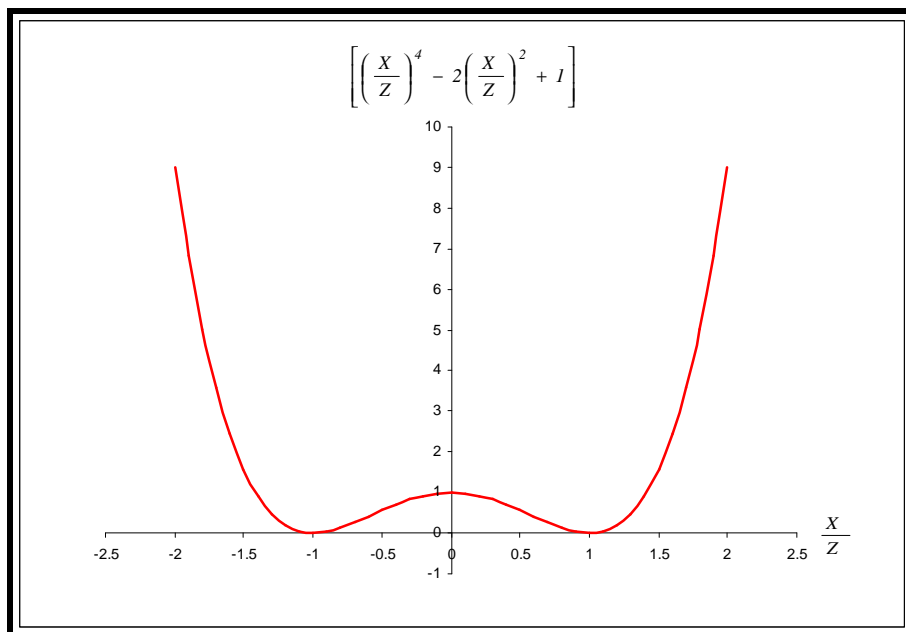
$$V^8 - 2 \frac{V^4}{Z^2} X^2 V^4 + \frac{V^8}{Z^4} X^4 \geq 0$$

Que finalmente puede escribirse como:

$$V^8 \left[ \left( \frac{X}{Z} \right)^4 - 2 \left( \frac{X}{Z} \right)^2 + 1 \right] \geq 0 \quad (2.5)$$

Ecuación que en el límite, es decir cuando es igual a cero establece la máxima transferencia de potencia posible entre el sistema y la carga, y, adicionalmente, una única solución del flujo de potencia.

El término entre paréntesis corresponde a una ecuación con trayectoria positiva, independientemente de los valores que tome la relación  $X/Z$ , llegando a un mínimo igual a cero, para dos puntos  $X/Z = \pm 1$ .



**Figura 2. 2 Trayectoria del factor de relación de impedancias**

En esta gráfica el semiplano positivo del eje de las abscisas, establece el comportamiento del sistema con la dirección del flujo de potencia desde el sistema hacia la carga, mientras que el semiplano negativo establece la dirección del flujo de potencia desde la carga hacia el sistema, condición que implicaría la presencia de generación y no de carga en la barra V. El origen,  $X/Z = 0$ , establece la condición de cero transferencia de potencia, condición que puede darse si la impedancia del sistema X es cero, se estaría en un caso de carga junto a la barra infinita y no se transfiere potencia por ninguna línea; o en caso de que la impedancia de carga, Z, sea muy grande comparada a la impedancia del sistema X, lo cual indicaría la imposibilidad de abastecer una carga muy grande, en comparación a la capacidad del sistema. Desde el punto de vista práctico, este punto de operación resulta improbable ya que el sistema habría ya alcanzado el estado inevitable de colapso.

En conclusión, la operación normal es la establecida en una parte del semiplano positivo, con un dominio de  $1 \leq X/Z < +\infty$ . En el límite izquierdo de este término, se establece la ya conocida condición de máxima transferencia de potencia del sistema hacia la carga  $X/Z = 1$ . Es decir, que la transferencia será máxima cuando la impedancia de carga Z sea igual a la impedancia de la red X.

A partir de la ecuación 2.5 se plantea establecer un INDICE DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE - IMPEDANCIA "IEVZ", a través del análisis del comportamiento dinámico de la impedancia medida Z, y del voltaje V. Se analiza la relación Voltaje – Impedancia, a fin de establecer un indicador confiable ante inestabilidad de voltaje, basado en el comportamiento de estas dos variables muy ligadas entre sí durante el proceso de inestabilidad de voltaje; para esto se considera la siguiente relación, determinada desde la ecuación 2.5

$$\frac{V^8}{Z^n} \left[ \frac{X^4}{Z^{4-n}} - 2 \frac{X^2}{Z^{2-n}} + Z^n \right] = IEVZ \cdot \left[ \frac{X^4}{Z^{4-n}} - 2 \frac{X^2}{Z^{2-n}} + Z^n \right] \geq 0 \quad (2.6)$$

$$IEVZ = \frac{V^8}{Z^n}$$

Este indicador, en el que se presenta una variable que se denominará “Exponente de Impedancia - n”, será siempre mayor a cero si existe al menos una solución del flujo de potencia. Esto se puede concluir si se desarrolla la ecuación 2.5, de la siguiente manera:

$$IEVZ \cdot Z^n \cdot \left[ \left( \frac{X}{Z} \right)^4 - 2 \left( \frac{X}{Z} \right)^2 + 1 \right] \geq 0$$

Donde, como se demostró anteriormente, el término entre paréntesis será positivo en todo su dominio, al igual que el modulo de la impedancia Z.

Un análisis más detallado de la relación V/Z, presentado en la siguiente sección, permite establecer la dependencia del IEVZ del voltaje en el punto de medición:

$$IEVZ_{(V)} = \frac{V^8}{Z_{(V)}^n}$$

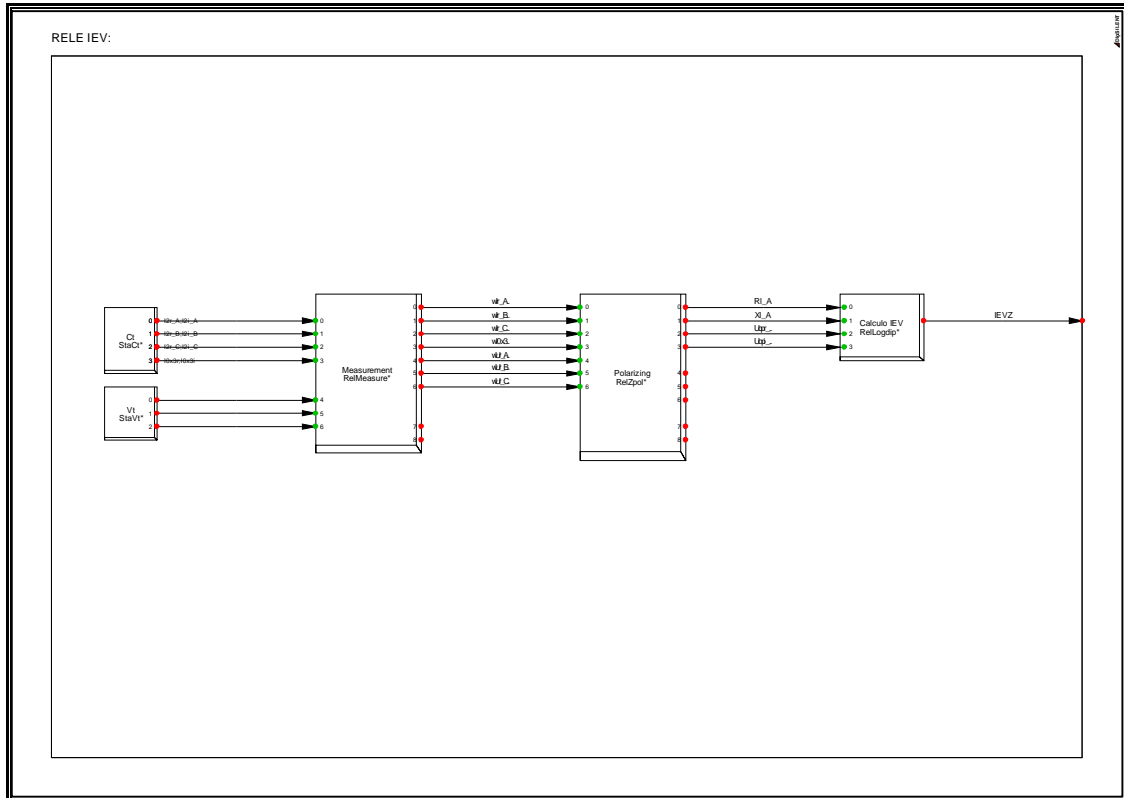
## **2.1.2 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL IEVZ**

El IEVZ, representa la operación matemática de dos variables: Voltaje e Impedancia. Consecuentemente, se requiere el modelamiento de un dispositivo que permita operar estas variables.

El Power Factory de DigSilent, permite el desarrollo de modelos personalizados de dispositivos de protección, mediante el manejo de bloques interconectados con los cuales se desarrolla el modelo que permite analizar el IEVZ.

### **2.1.2.1 Modelo de relé para el cálculo del IEVZ**

En la figura 2.3, se indica el diagrama de bloques que constituye el dispositivo que permite el cálculo del IEVZ. [10]



**Figura 2. 3 Diagrama de Bloques del Relé IEV**

El diagrama consta de 5 bloques, éstos son:

- Ct.- Bloque de definición de un Transformador de Corriente.
- Vt.- Bloque de definición de un Transformador de Voltaje.
- Measurement.- Bloque de definición de medición, permite la medición y cálculo de valores eficaces de las señales que ingresen al mismo.
- Polarizing.- Este bloque realiza dos funciones principales:
  - o Define los métodos de polarización para establecer la característica de direccionalidad requerida por cualquier relé de impedancia, para este análisis se utilizará el método de polarización propio, es decir que el cálculo de la impedancia se realizará mediante las relaciones de voltajes y corrientes que se correspondan, por ejemplo  $V_a$  con  $I_a$  o  $V_{ab}$  con  $I_{ab}$ .
  - o Calcula los lazos de medición de impedancias, tanto fase – fase y fase – tierra. Para el presente trabajo se utiliza únicamente el lazo de impedancia de fases AB, por las razones que se indican más adelante.

- Cálculo IEVZ.- Este bloque realiza el cálculo del IEVZ, mediante una lógica interna programada. El cálculo lo realiza en por unidad, en concordancia con el planteamiento matemático realizado en 2.1. La señal de salida IEVZ será procesada mediante programación en DigSilent Programming Language – DPL a fin de establecer la actuación del esquema de desconexión de carga que se defina.

Tanto el Ct como el Vt, utilizan un modelo lineal que no considera saturación, con la finalidad de evitar las distorsiones por saturación de los voltajes y corrientes que ingresen al cálculo del IEVZ. Además, se ha considerado relaciones de transformación unitarias, de tal manera que la impedancia calculada por el dispositivo corresponda a valores primarios.

Debido a que el fenómeno de estabilidad de voltaje se desarrolla como un fenómeno totalmente balanceado, se utilizará la impedancia medida  $Z_{(V)}$ , correspondiente a la impedancia calculada por cualquier relé considerando el lazo fase – fase, es decir, el lazo de medición de impedancia sin contacto a tierra. Este lazo de impedancia viene definido de la siguiente manera:

$$Z = \frac{\dot{V}_{LL}}{\dot{I}_{LL}}$$

Donde  $\dot{V}_{LL}$  e  $\dot{I}_{LL}$ , representan el voltaje y corriente línea a línea, consecuentemente se establecen tres lazos de medición de impedancias

$$Z_{ab} = \frac{\dot{V}_{ab}}{\dot{I}_{ab}}, Z_{bc} = \frac{\dot{V}_{bc}}{\dot{I}_{bc}} \text{ y } Z_{ca} = \frac{\dot{V}_{ca}}{\dot{I}_{ca}}$$

Debido a las condiciones balanceadas existentes, los tres lazos de medición de impedancias serán iguales en cualquier instante de tiempo; consecuentemente se utilizará uno solo de los lazos de medición correspondiente a las fases A y B.

### 2.1.2.2 Análisis y simulaciones preliminares

Para la simulación del comportamiento del IEVZ, se realizará un análisis preliminar de estabilidad de voltaje tomando en cuenta los siguientes aspectos generales:



- Análisis mediante flujos de continuación considerando únicamente la determinación de la parte superior de la curva PV. Se utiliza la metodología de escalamiento de carga mediante incremento progresivo del factor  $\lambda$ .
- No se considera la dinámica de restauración de la carga.
- Se realizan simulaciones considerando los modelos de carga indicados en 1.4.2.
- Exponente de Impedancia “n” igual a uno.

$$IEVZ_{(V)} = \frac{V^8}{Z_{(V)}}$$

El análisis se lo realiza mediante un sistema modelado a 138 kV, con una potencia base de 100 MVA; la información detallada de los datos del sistema se indica en el Anexo A. El sistema considerará el abastecimiento de una carga de 1pu en todos sus escenarios.

Posteriormente se analizará el comportamiento del IEVZ, considerando variaciones del sistema, voltaje de la barra infinita y cambios topológicos de la red.

#### ***2.1.2.2.1 Simulación del modelo exponencial de potencia constante - P***

El modelo exponencial de potencia constante, se analiza mediante las ecuaciones de carga, con los exponentes  $\alpha = \beta = 0$ , lo cual reduce el modelo de carga a:

$$P = P_o$$
$$Q = Q_o$$

El modelo considera el abastecimiento de una carga de 1 pu, con factor de potencia 0.95 inductivo, tal como se indica en la figura 2.4. En esta figura se observa la condición inicial de convergencia de flujo de carga.

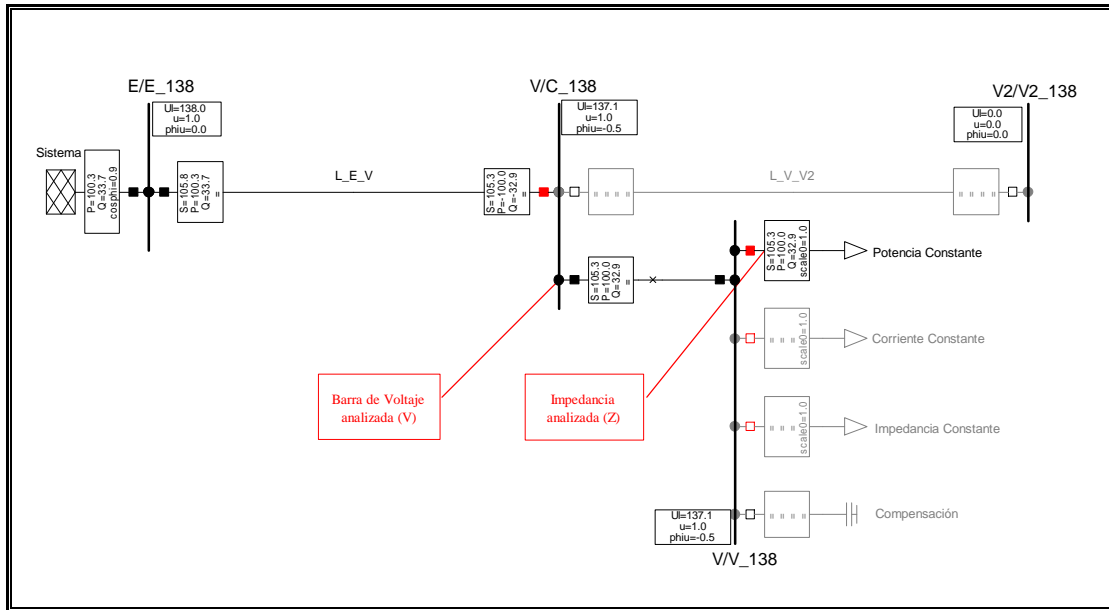


Figura 2. 4 Modelo de carga exponencial de Potencia constante

En la figura 2.5 se detalla la curva PV, analizando el voltaje en la barra “V/C\_138” como punto de análisis, y la medición de la impedancia realizada mediante un relé ubicado en el punto de carga.

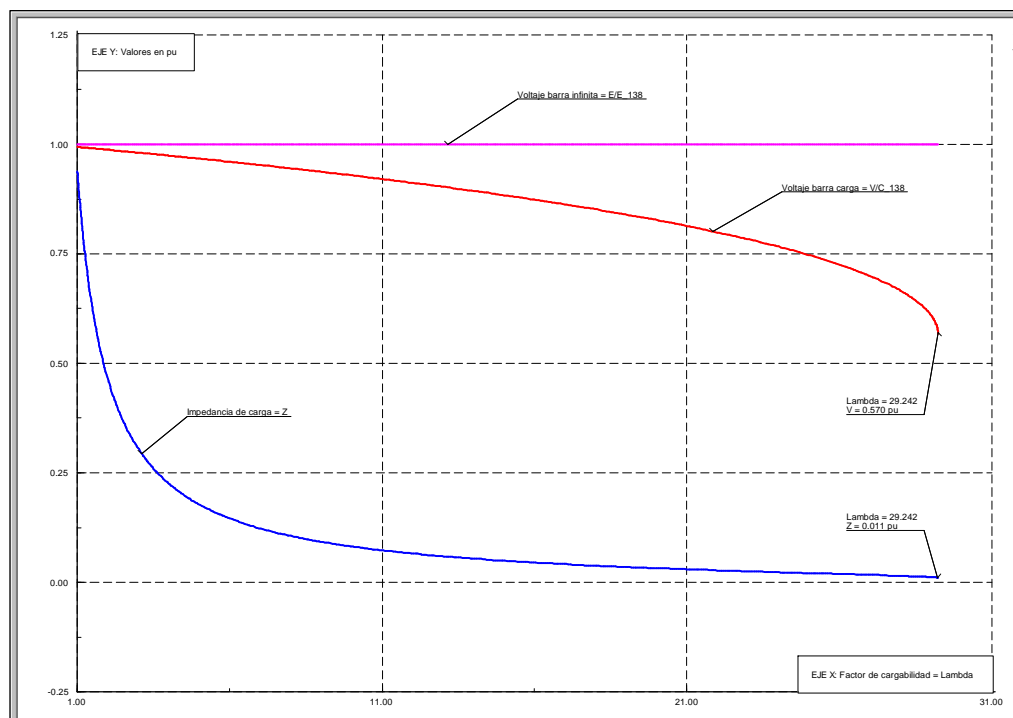
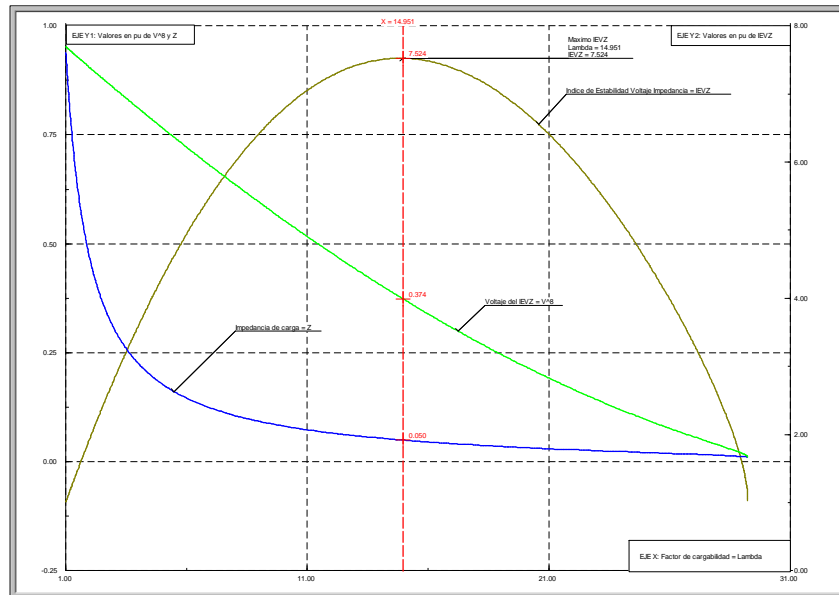


Figura 2. 5 Curva V y Z vs P

En la figura 2.6 se detalla el cálculo de las variables que intervienen en el IEVZ, es decir,  $V^\delta$ ,  $Z_{(V)}$  e  $IEVZ_{(V)}$ .



**Figura 2. 6 Curvas desarrolladas por el relé IEV**

De la figura 2.6, y como se indicó en 2.1, se observa que el IEVZ siempre será positivo para todo punto de la parte superior de la curva PV, con excepción del punto de bifurcación ( $\lambda_{max} = 29.242$ ,  $V = 0.570$  pu), en el que tendrá un valor de cero, condición que establece la máxima transferencia de potencia posible.

Se observa también que, mientras se incrementa el factor de cargabilidad  $\lambda$ , existe un decrecimiento tanto del parámetro de voltaje  $V^8$  como de la impedancia  $Z_{(v)}$ , cada una en distinta proporción. La tasa de decrecimiento del término  $V^8$  con respecto a  $\lambda$  resulta ser aproximadamente constante, mientras que la tasa de decrecimiento de la impedancia es variable, con un valor más grande en un inicio para posteriormente disminuir conforme se incrementa  $\lambda$ .

En el inicio la tasa de decrecimiento de  $V^8$  resulta ser menor que la de  $Z_{(v)}$ , conforme se incrementa  $\lambda$ , se establece un punto en el que el decrecimiento  $V^8$  supera el decrecimiento de  $Z_{(v)}$ , generando un máximo del IEVZ, para el caso  $\lambda = 14.951$ , que representa el 51% de la máxima cargabilidad. Como se puede prever, el valor de  $\lambda$  que origina un valor máximo, puede ser variable dependiendo del exponente de impedancia “n”, que para el caso se asumió 1. Esta particularidad se analizará en la siguiente sección.

### 2.1.2.2.2 Simulación del modelo exponencial de corriente constante - I

El modelo exponencial de corriente constante, se analiza mediante las ecuaciones de carga, con los exponentes  $\alpha = \beta = 1$ , lo cual reduce el modelo de carga a:

$$P = P_o \cdot \left( \frac{V}{V_o} \right)$$

$$Q = Q_o \cdot \left( \frac{V}{V_o} \right)$$

El modelo considera el abastecimiento de una carga de 1 pu, con factor de potencia 0.95 inductivo, tal como se indica en la figura 2.7. En esta figura se observa la condición inicial de convergencia de flujo de carga.

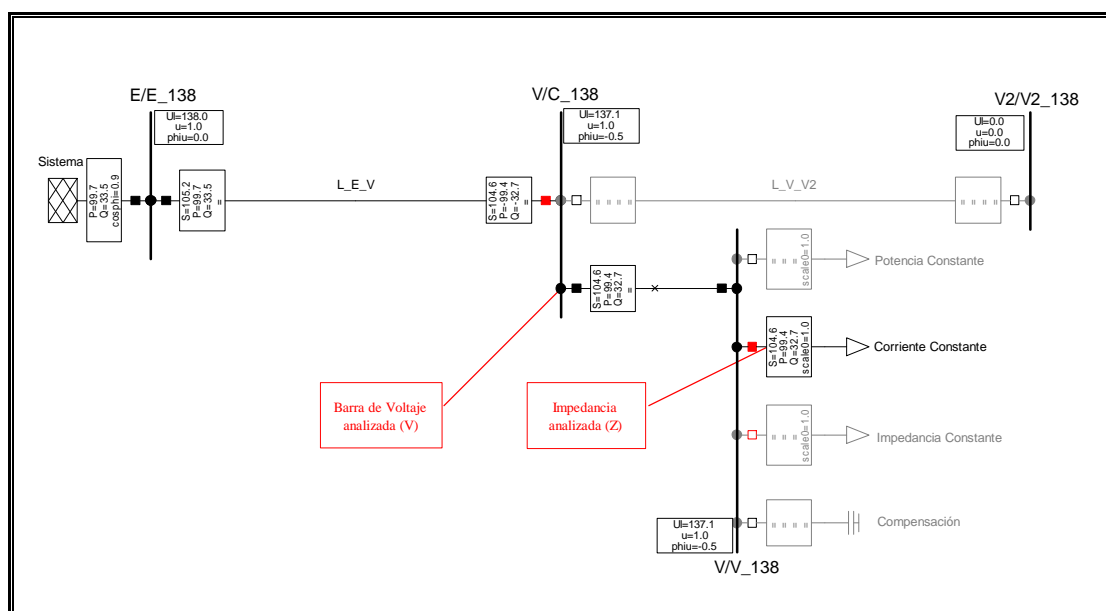


Figura 2. 7 Modelo de carga exponencial de Corriente constante

En la figura 2.8 se detalla la curva PV, analizando el voltaje en la barra “V/C\_138” como punto de análisis, y la medición de la impedancia realizada mediante un relé ubicado en el punto de carga.

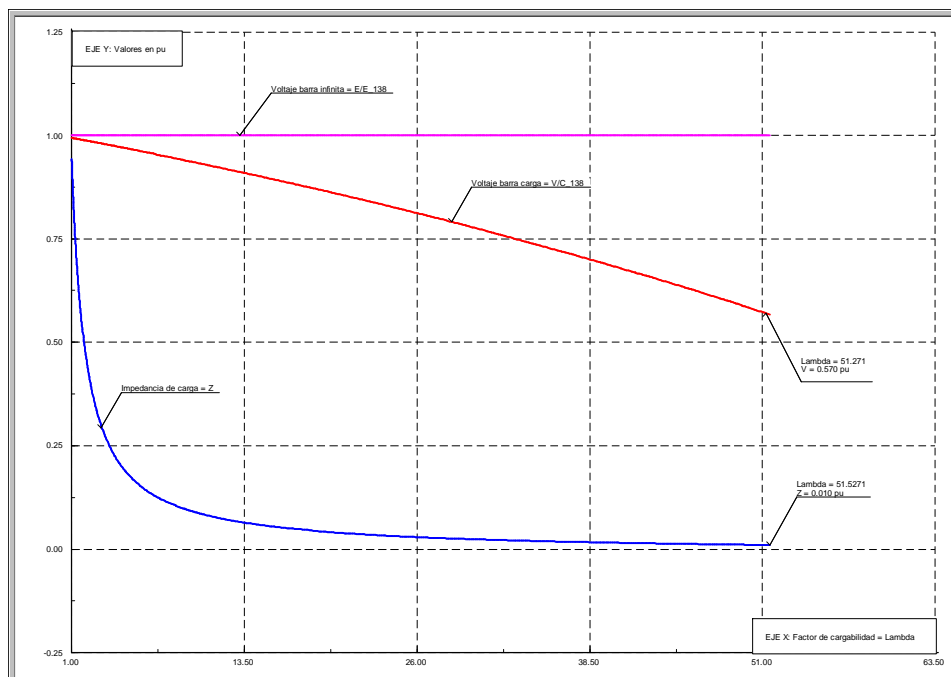


Figura 2. 8 Curva V y Z vs P

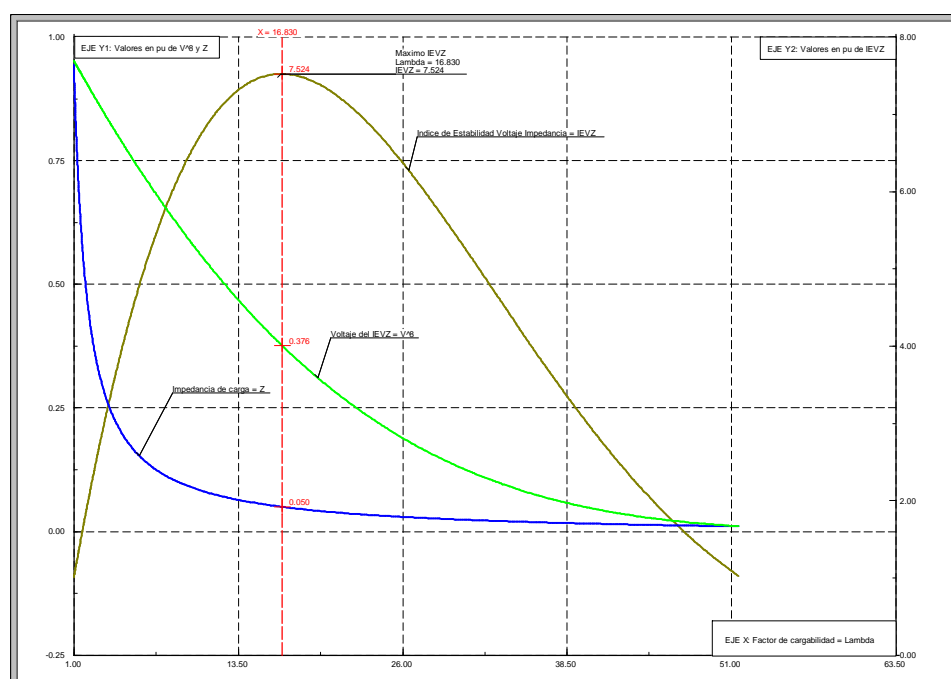


Figura 2. 9 Curvas desarrolladas por el relé IEV

De la figura 2.9 se observa que el IEVZ siempre será positivo para todo punto de la parte superior de la curva PV, con excepción del punto de bifurcación ( $\text{Lambda} = 57.271$ ,  $V = 0.570$  pu), en el que tendrá un valor de cero, condición que establece la máxima transferencia de potencia posible.

Se observa que se mantienen las características del IEVZ descritas en 2.1.2.2.1, y se genera un máximo del IEVZ en  $\lambda = 16.83$ , que representa el 29% de la máxima cargabilidad.

### 2.1.2.2.3 Simulación del modelo exponencial de impedancia constante - Z

El modelo exponencial de impedancia constante, se analiza mediante las ecuaciones de carga, con los exponentes  $\alpha = \beta = 2$ , lo cual reduce el modelo de carga a:

$$P = P_o \cdot \left( \frac{V}{V_o} \right)^2$$

$$Q = Q_o \cdot \left( \frac{V}{V_o} \right)^2$$

El modelo considera el abastecimiento de una carga de 1 pu, con factor de potencia 0.95 inductivo, tal como se indica en la figura 2.10. En esta figura se observa la condición inicial de convergencia de flujo de carga.

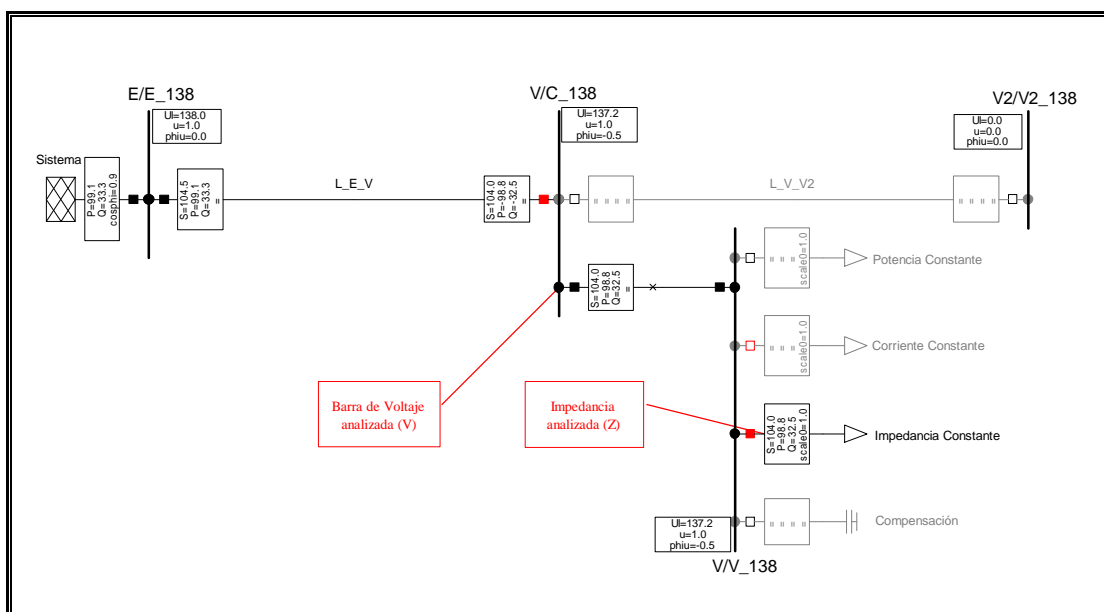


Figura 2. 10 Modelo de carga exponencial de Impedancia constante

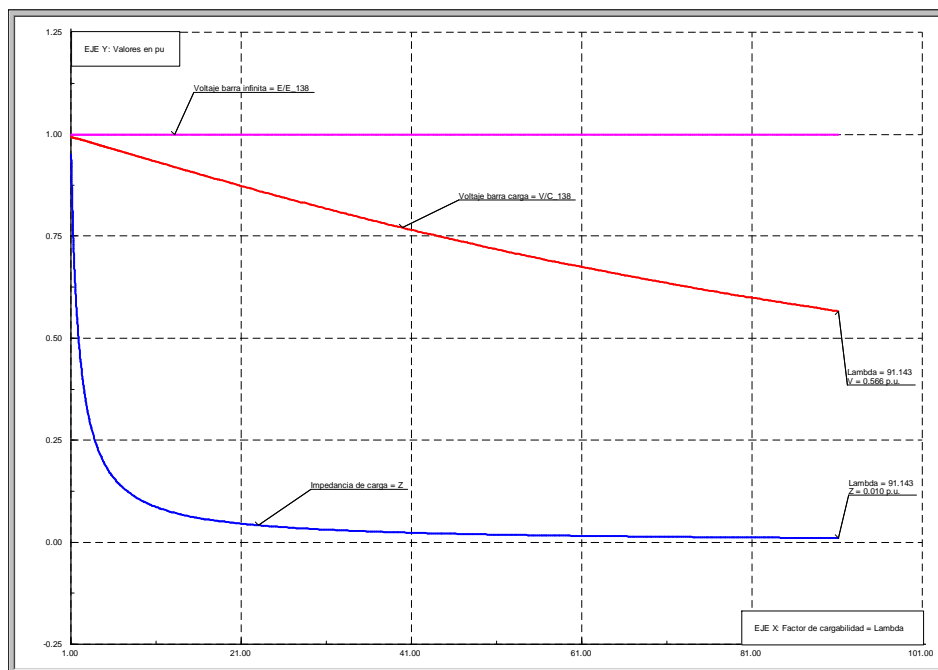


Figura 2.11 Curva V y Z vs P

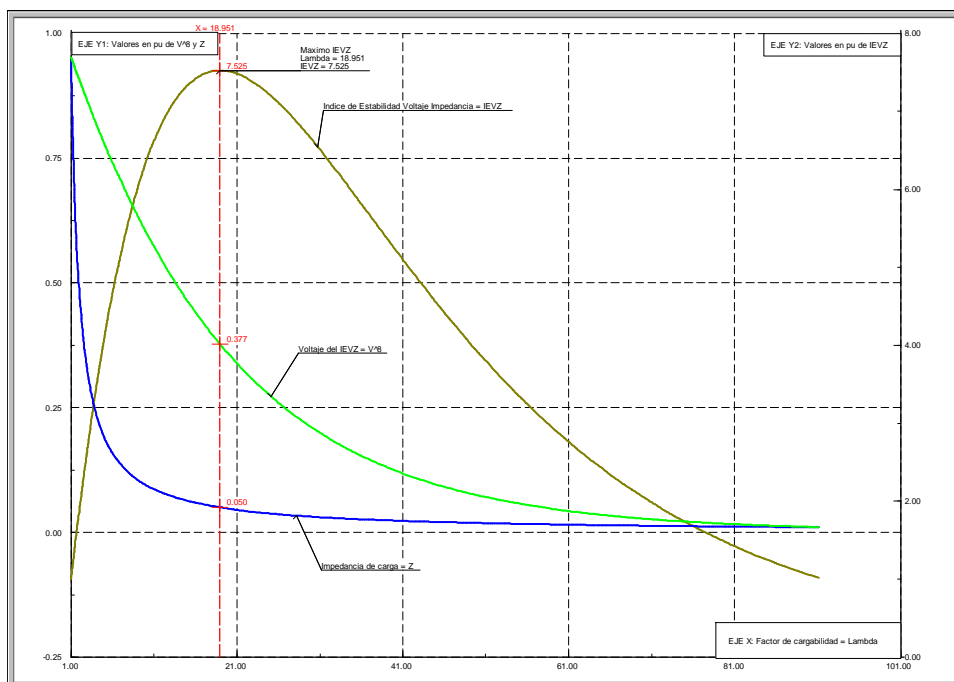


Figura 2.12 Curvas desarrolladas por el relé IEV

De la figura 2.12 se observa que el IEVZ siempre será positivo para todo punto de la parte superior de la curva PV, con excepción del punto de bifurcación ( $\text{Lambda} = 91.143$ ,  $V = 0.566 \text{ pu}$ ), en el que tendrá un valor de cero, condición que establece la máxima transferencia de potencia posible.

Se observa que se mantienen las características del IEVZ descritas en 2.1.2.2.1, y se genera un máximo del IEVZ en  $\lambda = 18.951$ , que representa el 21% de la máxima cargabilidad.

#### 2.1.2.2.4 Simulación del modelo polinomial ZIP

El modelo polinomial considera una carga formada por componentes de carga de potencia, corriente e impedancia constante, sumados polinomialmente

$$P = P_o \cdot \left[ a_P \left( \frac{V}{V_o} \right)^2 + b_P \left( \frac{V}{V_o} \right) + c_P \right]$$

$$Q = Q_o \cdot \left[ a_Q \left( \frac{V}{V_o} \right)^2 + b_Q \left( \frac{V}{V_o} \right) + c_Q \right]$$

El modelo considera el abastecimiento de una carga total de 1 pu, con factor de potencia 0.95 inductivo, tal como se indica en la figura 2.13. Para tal efecto se han considerado las variables:  $a_P = b_P = c_P = a_Q = b_Q = c_Q = \frac{1}{3}$ .

En esta figura se observa la condición inicial de convergencia de flujo de carga.

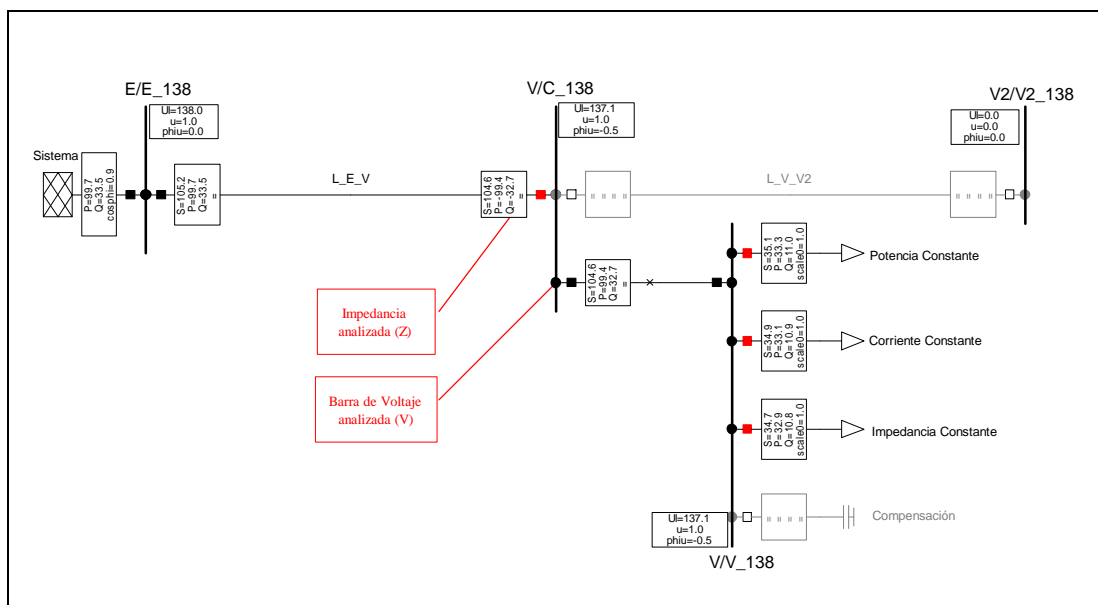
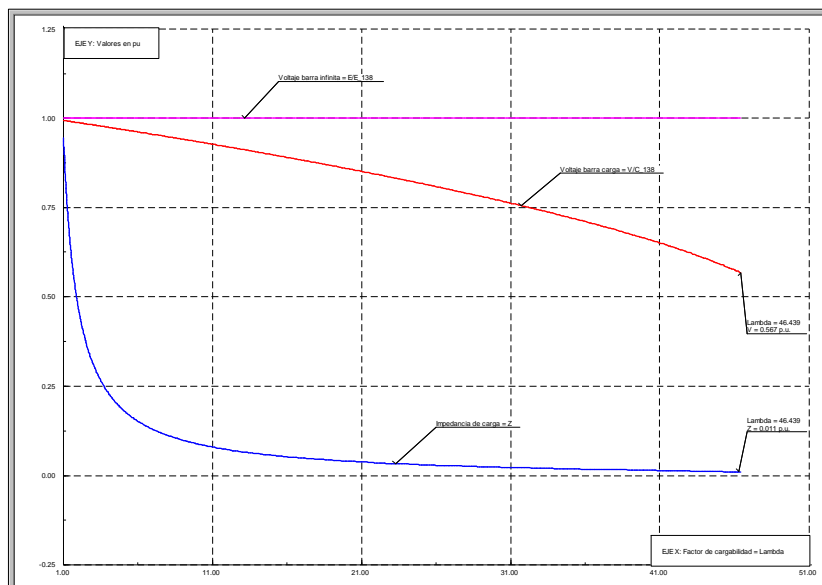
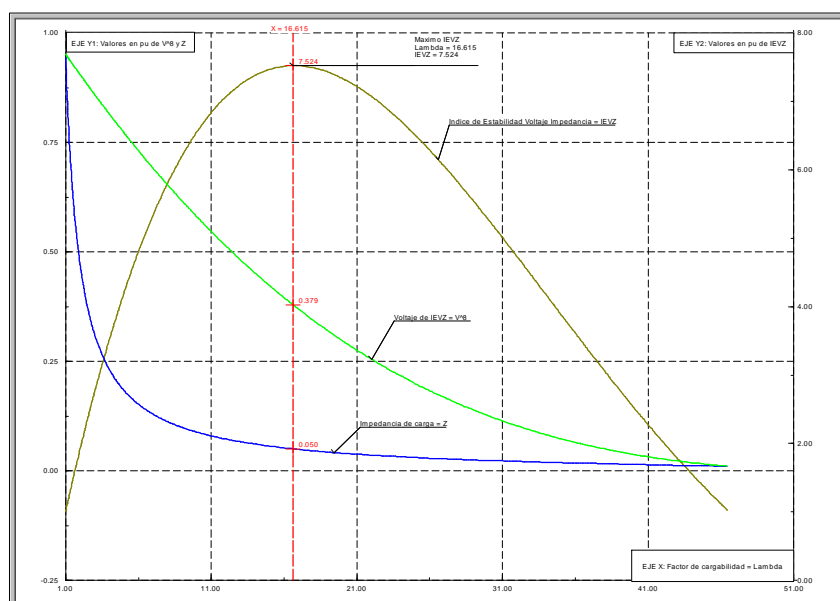


Figura 2. 13 Modelo de carga polinomial ZIP





**Figura 2.14 Curva V y Z vs P**



**Figura 2.15 Curvas desarrolladas por el relé IEV**

De la figura 2.15 se observa que el IEVZ siempre será positivo para todo punto de la parte superior de la curva PV, con excepción del punto de bifurcación ( $\lambda = 46.439$ ,  $V = 0.567$  pu), en el que tendrá un valor de cero, condición que establece la máxima transferencia de potencia posible.

Se observa que se mantienen las características del IEVZ descritas en 2.1.2.2.1, y se genera un máximo del IEVZ en  $\lambda = 16.615$ , que representa el 36% de la máxima cargabilidad.

2.1.2.2.5 Comparación de modelos y análisis de resultados

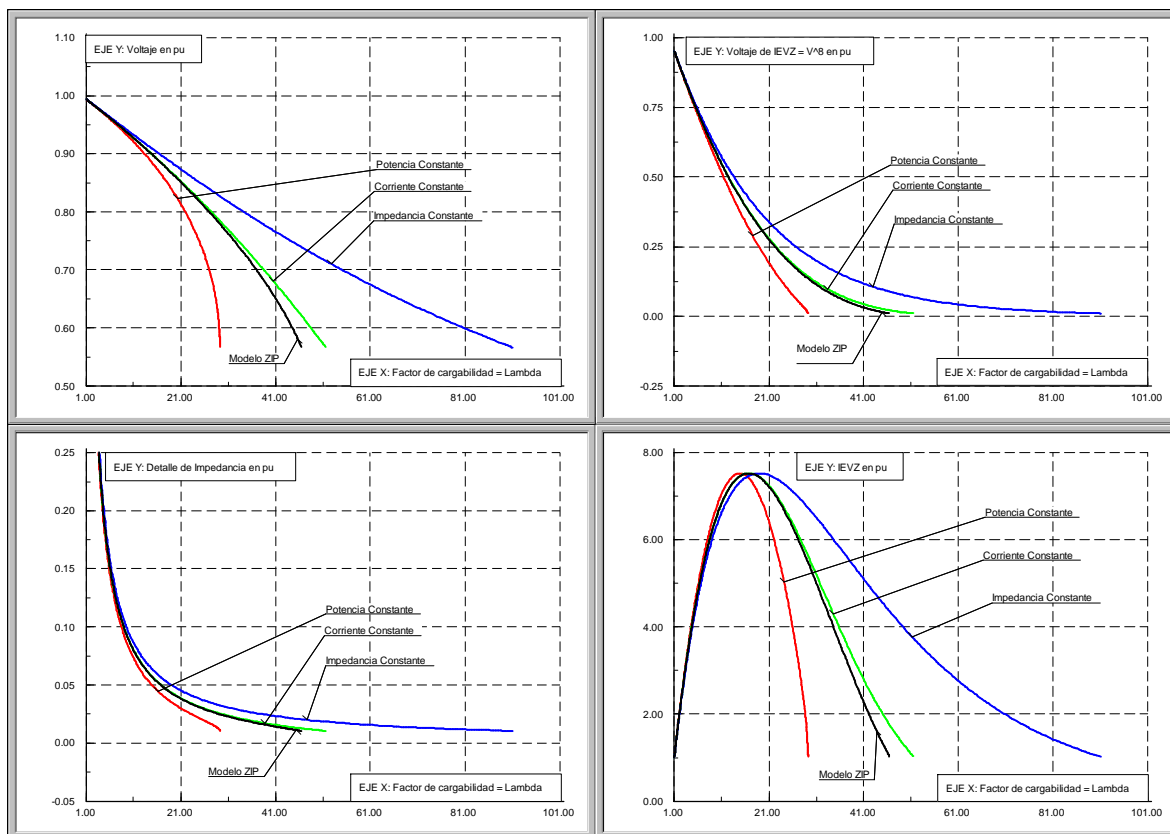


Figura 2. 16 Comparación de los modelos P, I, Z y ZIP

Modelo de carga	Máxima Cargabilidad				
	$\lambda_{max}$	V (pu)	$V^8$ (pu)	Z (pu)	IEVZ (pu)
P	29.242	0.570	0.011	0.011	1.000
I	51.527	0.570	0.011	0.010	1.100
Z	91.143	0.566	0.011	0.010	1.100
ZIP	46.439	0.567	0.011	0.011	1.000

Tabla 2. 1 Cuadro comparativo de los modelos P, I, Z y ZIP

Modelo de carga	En el punto de máximo IEVZ					
	$\lambda$	% de $\lambda_{max}$	V (pu)	$V^8$ (pu)	Z (pu)	IEVZ (pu)
P	14.951	51.129	0.884	0.374	0.050	7.524
I	16.830	32.662	0.885	0.376	0.050	7.524
Z	18.951	20.793	0.885	0.377	0.050	7.525
ZIP	16.615	35.778	0.886	0.379	0.050	7.524

Tabla 2. 2 Cuadro comparativo de los modelos P, I, Z y ZIP en el máximo IEVZ

De los resultados obtenidos se establece que la máxima transferencia se tiene en el modelo de Impedancia Constante, y la menor en el modelo de Potencia Constante. Se observa que el voltaje en el punto de máxima cargabilidad ocurre alrededor de 0.57 pu para todos los casos.

En cuanto al IEVZ, se observa que su valor máximo oscila en 7.5, para todos los modelos de carga. Por otra parte cuando ocurre el IEVZ máximo, dependiendo del modelo de carga, la cargabilidad presente en ese momento corresponde a un porcentaje diferente de su máxima cargabilidad. En el modelo de Impedancia Constante se tiene un 21% de la máxima cargabilidad, mientras que en el modelo de Potencia Constante este parámetro está en el orden del 51%.

De este análisis preliminar se observa que mediante el monitoreo del IEVZ, es posible establecer la actuación de un esquema de alivio de carga con la finalidad de mantener un margen de seguridad, definido en base a la cercanía al punto de bifurcación de la curva PV. El arranque del mismo puede plantearse considerando la determinación del valor máximo que presente el IEVZ, lo cual indica que una vez alcanzado este máximo, el sistema se encuentra operando con un nivel de cargabilidad superior al establecido como máximo operativo para el sistema. Sin embargo para la aplicación del mismo, es necesario el conocimiento y determinación del modelo de carga.

Sobre este último aspecto y considerando el análisis planteado hasta aquí, que corresponde a un SEP en el que cambian las características de carga y, considerando un "Exponente de Impedancia -  $n$ " igual a 1, el arranque del esquema de alivio de carga mediante el monitoreo del máximo IEVZ, puede no ser adecuado para el escenario de mayor cargabilidad, que corresponde al modelo de impedancia constante, ya que este máximo ocurre muy lejos de su máxima cargabilidad (21%) lo cual puede no ser lo mejor ya que subutilizaría la capacidad de respuesta del SEP. Esta situación puede mejorarse considerando la variación del exponente de impedancia " $n$ ", tal como se detallará en 2.1.3. Sin embargo, se debe señalar que la posibilidad de una variación pronunciada del modelo de carga generalmente se produce en períodos de tiempo largos, como

por ejemplo períodos estacionales, por lo que el establecimiento del monitoreo del IEVZ resultaría adecuado.

También se debe indicar que el nivel de voltaje en el punto de IEVZ máximo, para todos los modelos de carga planteados, oscila en 0.88 pu, lo cual puede resultar adecuado para activar un esquema de alivio de carga por bajo voltaje.

### 2.1.3 VARIACIÓN DEL EXPONENTE DE IMPEDANCIA “n” DEL IEVZ

Como se indicó en el punto anterior, si se considera el arranque de un esquema de alivio de carga por bajo voltaje mediante el monitoreo del IEVZ, existe la posibilidad, para ciertos escenarios, de subutilizar la capacidad de cargabilidad de un SEP. Mediante la variación del exponente de impedancia “n”, es posible modificar el porcentaje de cargabilidad en el que ocurrirá el IEVZ máximo, con lo cual se mejora el criterio de establecimiento de un escenario cercano a la inestabilidad.

Considerando, la definición dada para el IEVZ, se tiene un valor máximo del mismo, con respecto al voltaje, si se cumple:

$$\frac{d IEV_{(V)}}{dV} = 0$$

$$\frac{d IEV_{(V)}}{dV} = \frac{1}{Z_{(V)}^n} \left[ 8V^7 - \frac{nV^8 \frac{d Z_{(V)}}{dV}}{Z_{(V)}} \right] = 0$$

$$8Z_{(V)} - nV \frac{d Z_{(V)}}{dV} = 0$$

$$n \frac{\frac{d Z_{(V)}}{dV}}{Z_{(V)}} = \frac{8}{V} \quad (2.7)$$

Ecuación que puede ser integrada considerando límites máximos y mínimos dentro de un intervalo de integración:

$$\int_{Z_{min}}^{Z_{max}} n \frac{\frac{d Z_{(V)}}{dV}}{Z_{(V)}} = \int_{V_{min}}^{V_{max}} \frac{8}{V}$$

$$n \cdot \ln \left| Z(V) \right| \Big|_{Z_{min}}^{Z_{max}} = 8 \cdot \ln \left| V \right| \Big|_{V_{min}}^{V_{max}}$$

$$n \cdot [\ln |Z_{max}| - \ln |Z_{min}|] = 8 \cdot [\ln |V_{max}| - \ln |V_{min}|]$$

$$n = 8 \cdot \left[ \frac{\ln |V_{max}| - \ln |V_{min}|}{\ln |Z_{max}| - \ln |Z_{min}|} \right] \quad (2.8)$$

El intervalo de integración corresponde al definido por una “**banda de cargabilidad**” en la que se requiere se produzca el valor máximo del IEVZ. Esta banda de cargabilidad se establece como un rango porcentual  $\Delta\lambda$ , alrededor de un valor de cargabilidad específico  $\lambda_s$ , como se indica a continuación:

$$L_{S \min} < \lambda_S < L_{S \max}$$

$$L_{S \min} = \left( 1 - \frac{\Delta\lambda}{100} \right) \cdot \lambda_S \quad \text{y} \quad L_{S \max} = \left( 1 + \frac{\Delta\lambda}{100} \right) \cdot \lambda_S$$

Con estos límites de cargabilidad, se establecen los límites de integración de voltaje e impedancia, requeridos en la ecuación 2.8, tal como se indica en la figura 2.17 que corresponde a la simulación del modelo de carga ZIP con el exponente “n” igual a 1.

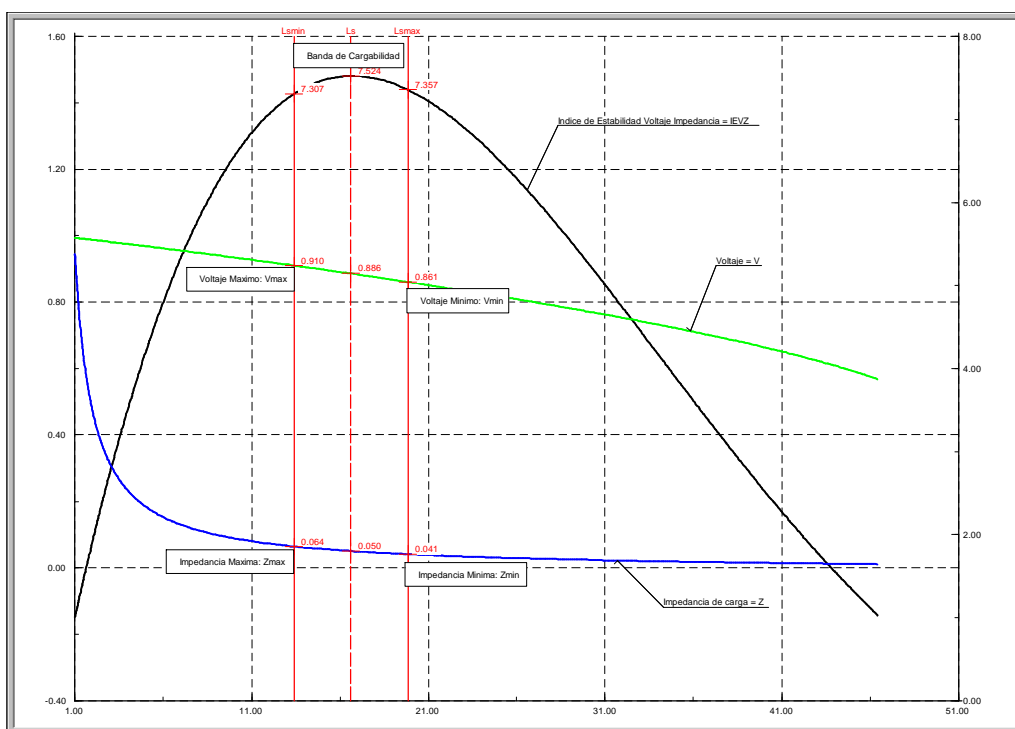


Figura 2. 17 Definición de la Banda de Cargabilidad

Se observa que para cada valor de los límites de cargabilidad  $L_{Smin}$  y  $L_{Smax}$ , se corresponden valores de Voltajes e Impedancias máximas y mínimas, respectivamente. Esto es por cuanto a menor cargabilidad corresponden valores de Voltaje e Impedancia mayores que los que se presentan con una mayor cargabilidad.

La determinación del valor de cargabilidad específico  $\lambda_s$ , así como del rango  $\Delta\lambda$ , que establecen la banda de cargabilidad, se realiza sobre el parámetro que establezca el margen de estabilidad de voltaje del sistema, tal como se expuso en 1.6.

### 2.1.3.1 Determinación del exponente de impedancia “n”

Uno de los parámetros de estabilidad de voltaje es la cercanía del punto de operación del SEP a la máxima cargabilidad. A continuación se desarrolla el análisis considerando que el margen será determinado en base a un porcentaje de la máxima cargabilidad del SEP ( $\lambda_{max}$ ). La determinación de  $\lambda_{max}$  se la realiza utilizando la herramienta de flujos de continuación. El valor de  $\lambda_{max}$  corresponde al determinado para el escenario de mayor cargabilidad que se presente, de esta manera no se subutilizará la capacidad de respuesta del SEP para este escenario.

El criterio de estabilidad en base a porcentaje de cargabilidad se establece a través de un valor de cargabilidad de ajuste  $\lambda_s$ , definido como un porcentaje de la máxima cargabilidad  $\lambda_{max}$ . El IEVZ entonces deberá presentar un máximo oscilando en el valor de cargabilidad de ajuste  $\lambda_s$ . Con la finalidad de establecer los límites de integración requeridos en la ecuación 2.8, se define un rango porcentual  $\Delta\lambda$ , alrededor de la cargabilidad de ajuste  $\lambda_s$ , con lo que se define la “**banda de cargabilidad**” antes mencionada, de la siguiente manera:

$$L_{Smin} < \lambda_s < L_{Smax}$$

$$L_{Smin} = \left(1 - \frac{\Delta\lambda}{100}\right) \lambda_s < \lambda_s < L_{Smax} = \left(1 + \frac{\Delta\lambda}{100}\right) \lambda_s$$

Con estos límites de cargabilidad, se establecen los valores de integración de voltaje e impedancia requeridos. A continuación se indican los resultados de la determinación del exponente de impedancia adecuado para cada modelo de carga analizado en 2.1.2. La simulación considera obtener un máximo del IEVZ para un valor de cargabilidad del 90% de la máxima cargabilidad que se presente para cada modelo de carga, es decir,  $\lambda_s = 0.9 \lambda_{max}$ , y un rango  $\Delta\lambda \approx 2\%$ .



Modelo de carga	$I_{max}$	$L_{Smin} = 0.88 I_{max}$	$I_s = 0.9 I_{max}$	$L_{Smax} = 0.92 I_{max}$
P	29.242	25.733	26.318	26.903
I	51.527	45.437	46.374	47.292
Z	91.143	80.379	82.029	83.660
ZIP	46.439	40.866	41.795	42.724

Tabla 2. 3 Definición del exponente de impedancia "n"

Las bandas de cargabilidad establecidos, dibujados sobre la curva PV para cada modelo de carga, se indican en la figura 2.18.

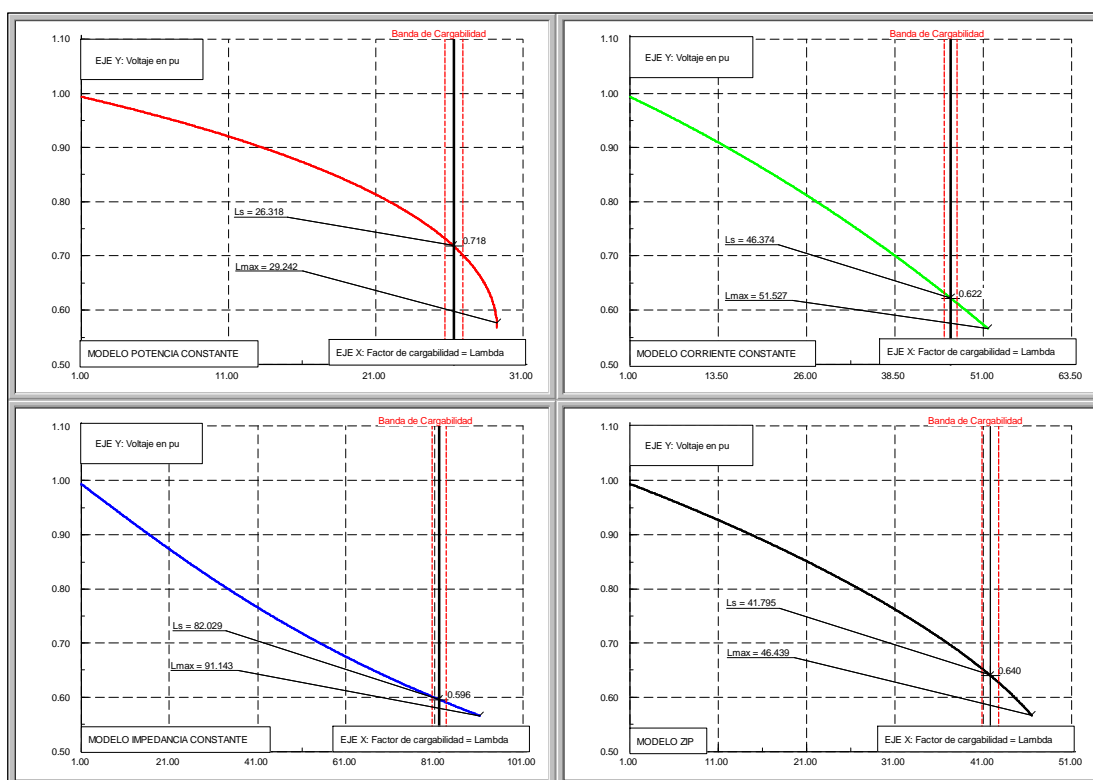


Figura 2. 18 Bandas de cargabilidad para los modelos P, I, Z y ZIP

Los valores de voltaje e impedancia para  $L_{smin}$  y  $L_{smax}$ , se detallan en la siguiente figura:

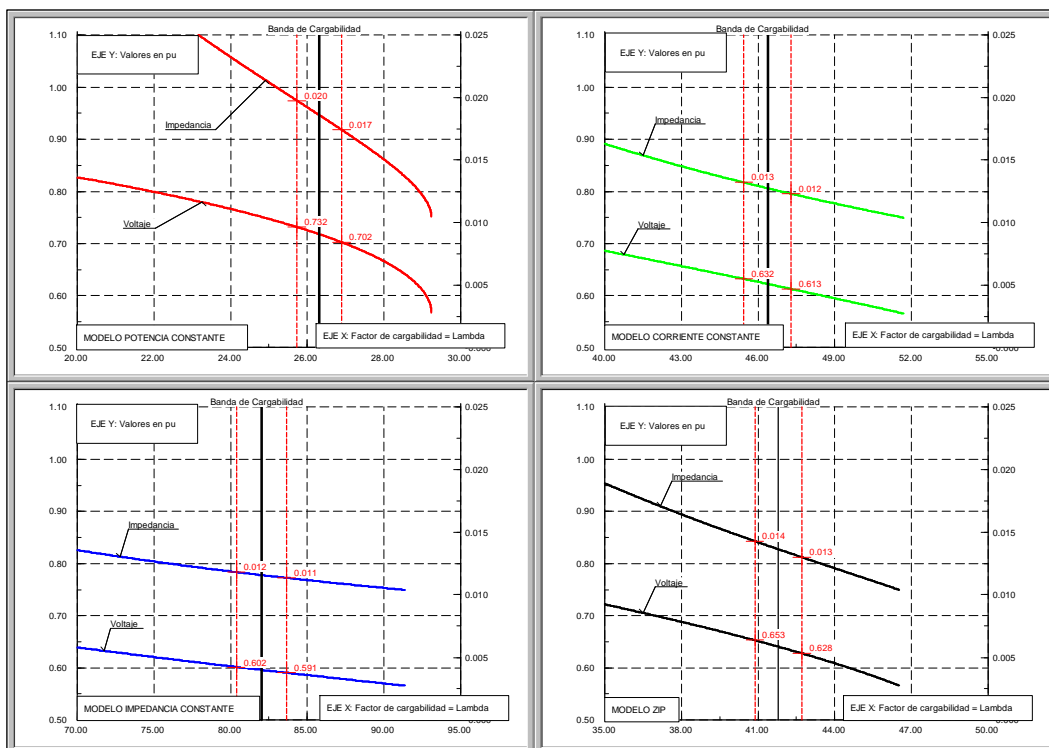


Figura 2. 19 Detalle de Voltaje e Impedancia dentro de la banda de cargabilidad

Con este detalle es posible determinar el exponente de impedancia "n", como se indica en la tabla 2.4.



Modelo de carga	$L_{smin} = 0.88 I_{max}$		$L_{smax} = 0.92 I_{max}$		$n = 8 \cdot \frac{\ln V_{max}  - \ln V_{min} }{\ln Z_{max}  - \ln Z_{min} }$
	$V_{max}$	$Z_{max}$	$V_{min}$	$Z_{min}$	
P	0.73060	0.01967	0.70437	0.01757	2.590736
I	0.63213	0.01322	0.61296	0.01232	3.494171
Z	0.60172	0.01182	0.59062	0.01136	3.752528
ZIP	0.65192	0.01425	0.62920	0.01308	3.312396

Tabla 2. 4 Cálculo del exponente de impedancia "n"

Con el valor del exponente de impedancia determinado se realiza la simulación del IEVZ para cada modelo de carga planteado, los resultados se indican en la figura 2.20.



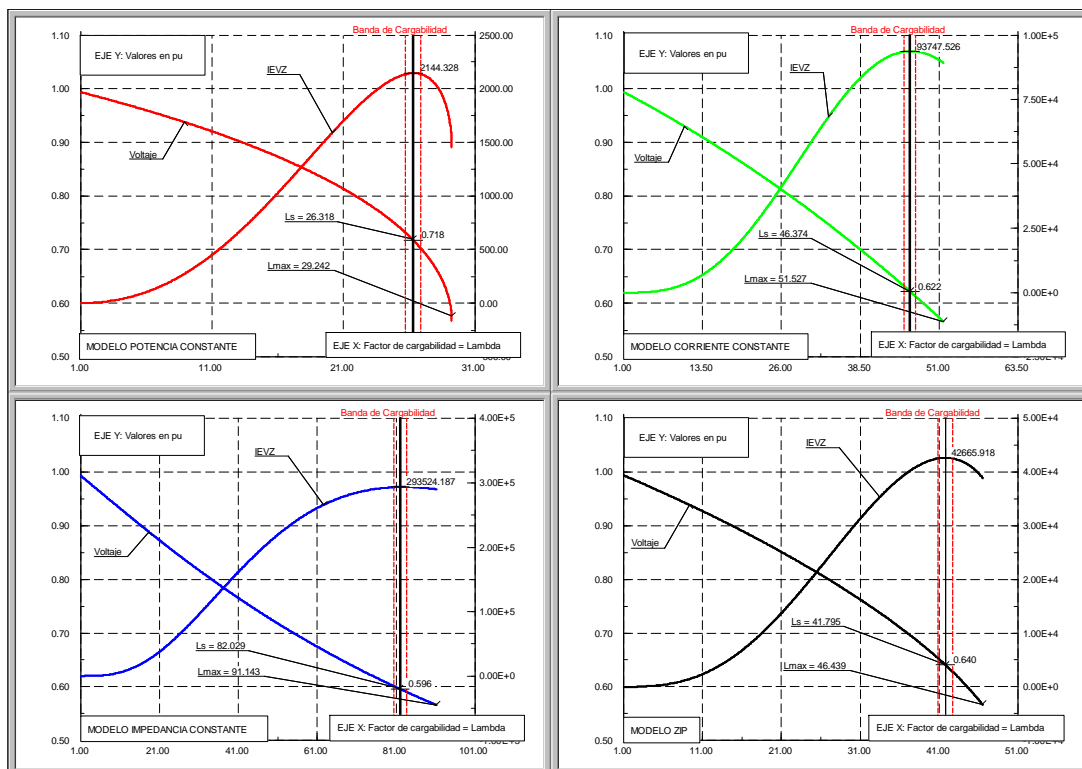


Figura 2. 20 Simulación del IEVZ para los modelos P, I, Z y ZIP

Se puede observar que efectivamente el máximo valor del IEVZ ocurre en el valor de cargabilidad de ajuste  $\lambda_s = 0.9 \lambda_{max}$ , el mismo que se determina en base a estudios eléctricos y condiciones operativas preestablecidas.

En resumen, es posible determinar un valor de "n", tal que genere un máximo del IEVZ dentro de un intervalo seleccionado, y mediante el monitoreo permanente de su trayectoria es posible establecer la activación de un mecanismo de desconexión de carga. De la misma manera es posible establecer alarmas cuando el SEP se acerque a valores de cargabilidad preestablecidos como peligrosos o de alerta. Cabe señalar que cuando se establece como parámetro de estabilidad únicamente el porcentaje de cargabilidad, y dependiendo del SEP, se puede llegar a condiciones en las que cuando se tenga el porcentaje de cargabilidad establecido, el voltaje se encuentre en valores muy bajos tal que las protecciones asociadas a esta variable puedan actuar, acelerando el colapso del sistema. Por tal razón en la determinación del parámetro de estabilidad se plantea realizarlo considerando dos variables de manera conjunta: porcentaje de cargabilidad y voltaje mínimo.

## 2.1.4 MODIFICACIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE LA RED

A continuación se desarrolla un análisis considerando variación de la topología de la red. Desde el punto de vista de estado estable, mediante la variación de la impedancia de la red pueden modelarse algunos escenarios como: despacho de generación, contingencias en el SEP, compensación reactiva serie, entre otros, mientras que eventos como la compensación reactiva en paralelo requiere de un análisis independiente. A continuación se desarrolla un análisis tomando en cuenta estas dos condiciones, así como considerando el modelo de carga ZIP y el planteo inicial del EACIV indicado en 2.1.1, es decir, manteniendo constante el exponente de impedancia “ $n$ ” en 1.069657.

### 2.1.4.1 Variación de la impedancia de la red

Para el caso de carga – barra infinita, esto puede analizarse considerando una variación de la impedancia de la L/T. A continuación se presentan las simulaciones considerando impedancias de la red del orden del 0.5, 1 y 2 veces la impedancia de la red inicialmente planteada para el modelo de carga ZIP. En la figura 2.21, se indican los resultados de la simulación.

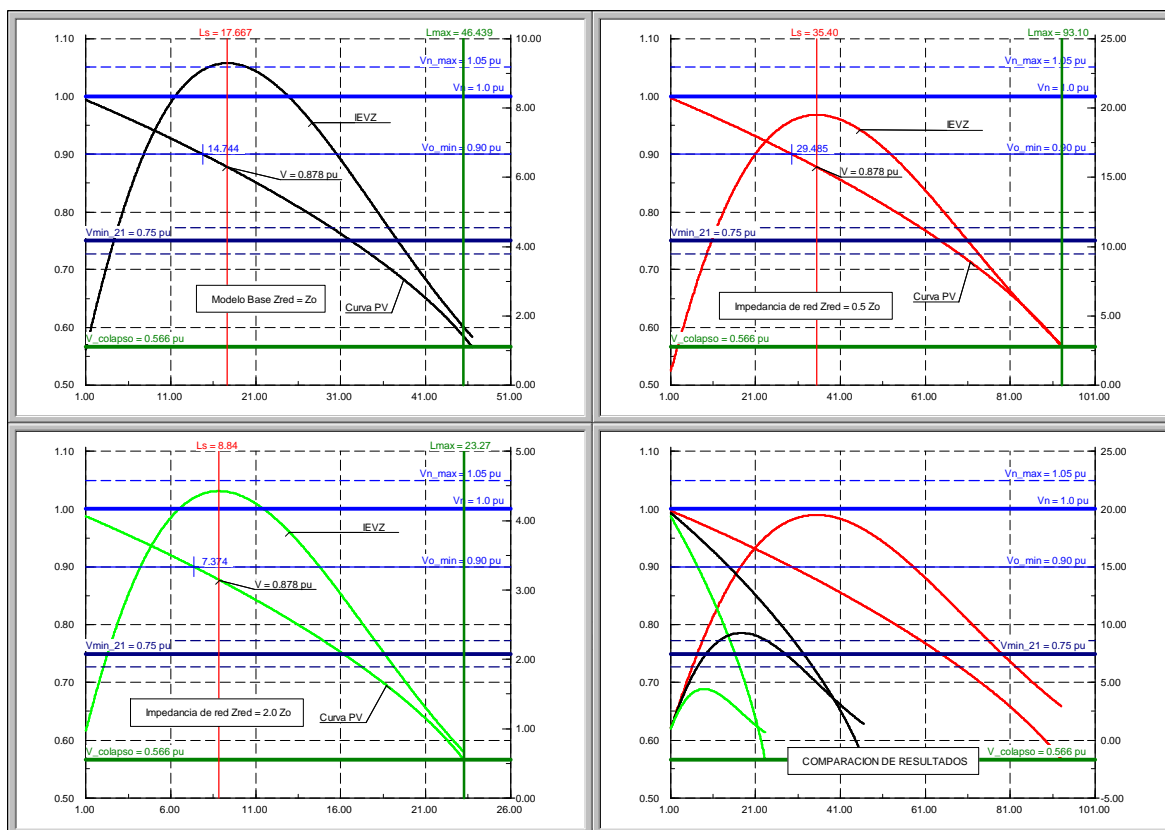


Figura 2. 21 Simulación del IEVZ ante cambios en la impedancia de la red

En la figura 2.21 se observa que se obtienen diversos niveles de cargabilidad máximos siendo el mayor para el caso de menor impedancia de la red. Sin embargo, independientemente del valor de la impedancia de la red, el valor máximo del IEVZ ocurre en el porcentaje de cargabilidad inicialmente establecido, es decir  $0.38 \lambda_{max}$ , y para este análisis, en el mismo nivel de voltaje. Esta situación resulta de gran utilidad por cuanto la relación planteada por el IEVZ, presentará resultados similares, independientemente de la topología de la red, lo cual independiza el funcionamiento del EACIV, para ciertas condiciones operativas.

### 2.1.4.2 Compensación reactiva en la carga

La compensación reactiva, sea ésta inductiva o capacitiva, produce una modificación de la capacidad máxima de transferencia, para una misma condición topológica, es decir para una misma impedancia de la red. A continuación se presenta la simulación del IEVZ considerando: compensación capacitiva de 1 pu, condición nominal y compensación inductiva de 1 pu.

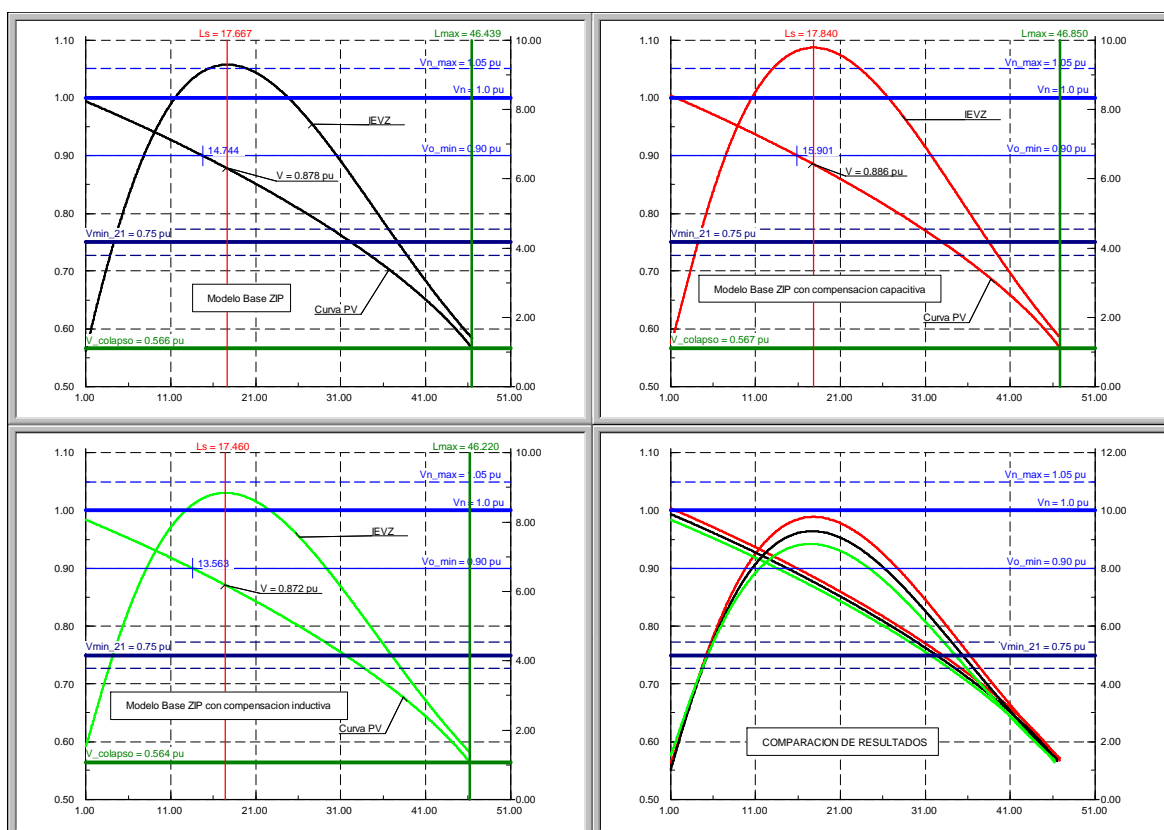


Figura 2. 22 Simulación del IEVZ ante compensación reactiva en la carga

Se observa que la capacidad máxima de transferencia es mayor para la compensación capacitiva, sin embargo, el valor máximo del IEVZ ocurre nuevamente en el mismo porcentaje de cargabilidad inicialmente establecido, es decir  $0.38 \lambda_{\max}$ , pero a diferencia del caso anterior, éstos se producen en diferentes niveles de voltaje. Sin embargo, en los tres escenarios planteados el voltaje se encuentra dentro de la banda establecida para la actuación del EACIV, por lo que la relación planteada por el IEVZ, presentará resultados similares, independientemente de la compensación realizada.

En conclusión, un EACIV considerando, como criterio de determinación de la inestabilidad de voltaje, al monitoreo del IEVZ, permite independizar el análisis de variaciones topológicas que impliquen cambios en las fuentes y equivalentes, con lo que se establece un criterio más confiable para establecer la cercanía a un punto de operación voltaje inestable, al menos para ciertos rangos de operación.

## **2.2 MÉTODO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ESQUEMA DE ALIVIO DE CARGA POR INESTABILIDAD DE VOLTAJE “EACIV” MEDIANTE ANÁLISIS DEL IEVZ**

Como se indicó en 2.1, el generar un valor máximo del IEVZ considerando como parámetro de estabilidad únicamente el porcentaje de cargabilidad, resultaría inadecuado por cuanto éste puede producirse cuando el voltaje se encuentre en valores muy bajos tales que el sistema llegue a un colapso definitivo por actuación de las protecciones asociadas a esta variable. Por ejemplo, los relés de protección de líneas de transmisión pueden generar una actuación de la función de impedancia cuando el voltaje se encuentre en valores muy bajos.

Consecuentemente se plantea establecer como parámetro de estabilidad un análisis conjunto entre porcentaje de cargabilidad y voltaje mínimo. Para desarrollar este análisis se requiere un trabajo coordinado entre ingenieros de protecciones e ingenieros de planeamiento eléctrico de tal manera que el esquema escogido sea adecuado para el SEP y aplicable desde el punto de vista práctico.

### 2.2.1 CONSIDERACIONES BÁSICAS

Como se mencionó, se requiere de un análisis desde dos puntos de vista: planeamiento eléctrico y protecciones. Desde el punto de vista del planeamiento eléctrico, se puede considerar el desarrollo del método explicado en 1.6. Los análisis dependerán de las particularidades de cada sistema, especialmente lo relacionado con la determinación del margen de estabilidad para el caso base y para las contingencias establecidas.

Considerando el punto de vista de protecciones, el esquema de alivio de carga debe cumplir con niveles adecuados de dependabilidad y seguridad. La dependabilidad de un sistema de protecciones se refiere al grado de certeza que el sistema de protecciones operará correctamente ante eventos que ocurran en su zona de protección, mientras que la seguridad se relaciona con el grado de certeza que el sistema de protecciones no operará ante eventos fuera de su zona de protección, es decir, el esquema debe ser confiable. Esta condición se cumple mediante la implementación de IEVZ, sin embargo, en el diseño del Esquema de Alivio de Carga por Inestabilidad de Voltaje "EACIV", se debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- El EACIV debe operar cuando el voltaje sea inferior a un voltaje mínimo de ajuste ( $V_{s\_min}$ ) y se determine un máximo IEVZ. Adicionalmente, y dependiendo de la precisión de los transformadores de potencial (TP), se debe adicionar el error nominal de los mismos.
- El EACIV no debe actuar cuando el voltaje se encuentre dentro de la banda de voltaje de operación nominal, adicionalmente debe considerar el voltaje mínimo en condiciones de emergencia o de maniobras. Estos límites son establecidos en los procedimientos operativos y regulaciones vigentes. Generalmente la banda de operación normal es de  $0.95V_n < V_n < 1.05V_n$ , y el voltaje mínimo en condiciones de emergencia o de maniobras ( $V_{o\_min}$ ) es del orden de  $0.90V_n$ , donde  $V_n$  corresponde al voltaje nominal.

- Las protecciones de distancia pueden actuar ante voltajes bajos tales que la impedancia medida por los mismos ingrese en la zona de ajuste de protección definida, acelerando de esta manera el colapso del sistema. Considerando un ajuste resistivo típico para la zona más extrema: Zona 3, ésta se define como el valor de impedancia que representa el 120% de la corriente nominal del transformador de corriente ( $I_{nTC}$ ) que alimenta al relé de distancia, calculado al voltaje mínimo operativo ( $V_{o\_min}$ ), consecuentemente:

$$\text{Alcance resistivo} = \frac{V_{o\_min}}{1.2 I_{nTC}} = \frac{0.9V_n}{1.2 I_{nTC}} = \frac{0.75}{I_{nTC}}$$

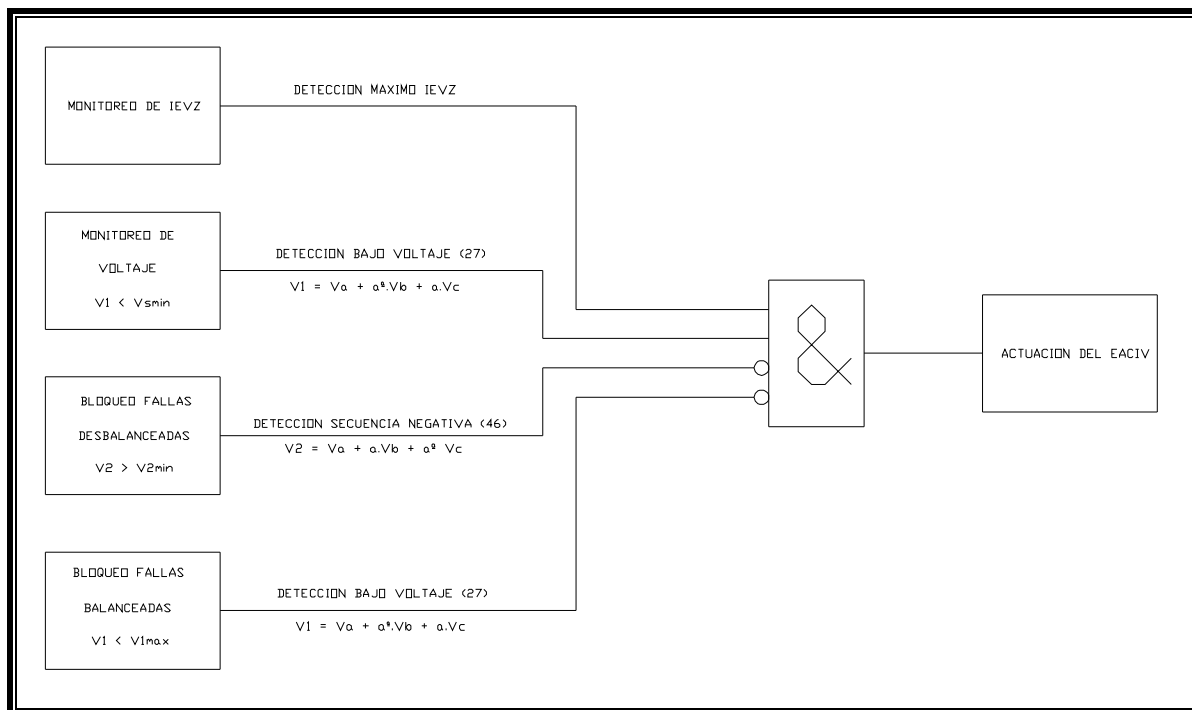
Cuando se produce una sobrecarga en la L/T sus protecciones actuarían si la impedancia calculada por el relé ( $Z_R$ ) iguala a este alcance resistivo.

$$Z_R = \frac{V_R}{I_R} = \frac{0.75}{I_{nTC}}$$

Donde  $V_R$  e  $I_R$  corresponden al voltaje y corriente medidos por el relé, respectivamente. Si la corriente circulante por el relé ( $I_R$ ) es igual a la corriente nominal del transformador de corriente, entonces el relé operaría sí  $V_R = 0.75 pu$ . Si bien el ajuste resistivo de los relés de distancia puede ser mayor dependiendo de las transferencias de potencia que se presenten, este criterio puede ser utilizado en alguna parte del SEP, por lo que el valor determinado puede considerarse como un límite mínimo para la actuación del EACIV.

- El colapso de voltaje es generalmente un evento balanceado en el que los voltajes de las tres fases disminuyen aproximadamente igual. Por lo tanto el EACIV debe actuar únicamente ante condiciones balanceadas generadas por inestabilidad de voltaje, lo que implica que ante cortocircuitos el esquema no debe actuar [11], [12]. Para evitar esta situación se implementa un esquema de bloqueo mediante voltaje de secuencia negativa, de esta manera ante fallas desbalanceadas: fase – fase, fase – fase – tierra y fase – tierra, el esquema no actúa. Ante fallas trifásicas es posible implementar un esquema de bloqueo por bajo voltaje; generalmente en condiciones de inestabilidad de voltaje los niveles de

voltaje oscilan en valores superiores a los que existen en condiciones de falla, por lo que mediante el análisis de estos valores, particulares para cada SEP, es posible bloquear el EACIV ante fallas trifásicas. El esquema general de operación del EACIV se indica en la figura 2.23.



**Figura 2. 23 Esquema general de operación del EACIV**

Tomando en cuenta estas consideraciones, y a manera de ejemplo, se esboza el Esquema de Alivio de Carga por Inestabilidad de Voltaje “EACIV”, para el modelo de carga ZIP, detallado en 2.1.2.2.4. En la figura 2.24 se observa en negro la curva PV para el modelo de carga indicado; en azul claro la banda de voltaje de operación normal  $0.95V_n < V_n < 1.05V_n$ , así como el voltaje mínimo en condiciones de emergencia o de maniobras  $V_{o\_min} = 0.9V_n$ ; en azul oscuro se observa el voltaje de operación de los relés  $V_R = 0.75 pu$ ; en verde los límites de colapso: máxima cargabilidad y mínimo voltaje; y en rojo la banda de cargabilidad definida, la misma que considera que el máximo del IEVZ ocurra en un valor de cargabilidad correspondiente al 120% de la cargabilidad a voltaje  $V_{o\_min} = 0.9 pu$ .

Para el caso se tiene  $\lambda_s = 0.38 \lambda_{max}$  y  $V_{s\_min} = 0.878 pu$ ; se considera un rango  $\Delta\lambda \approx 2\%$ .

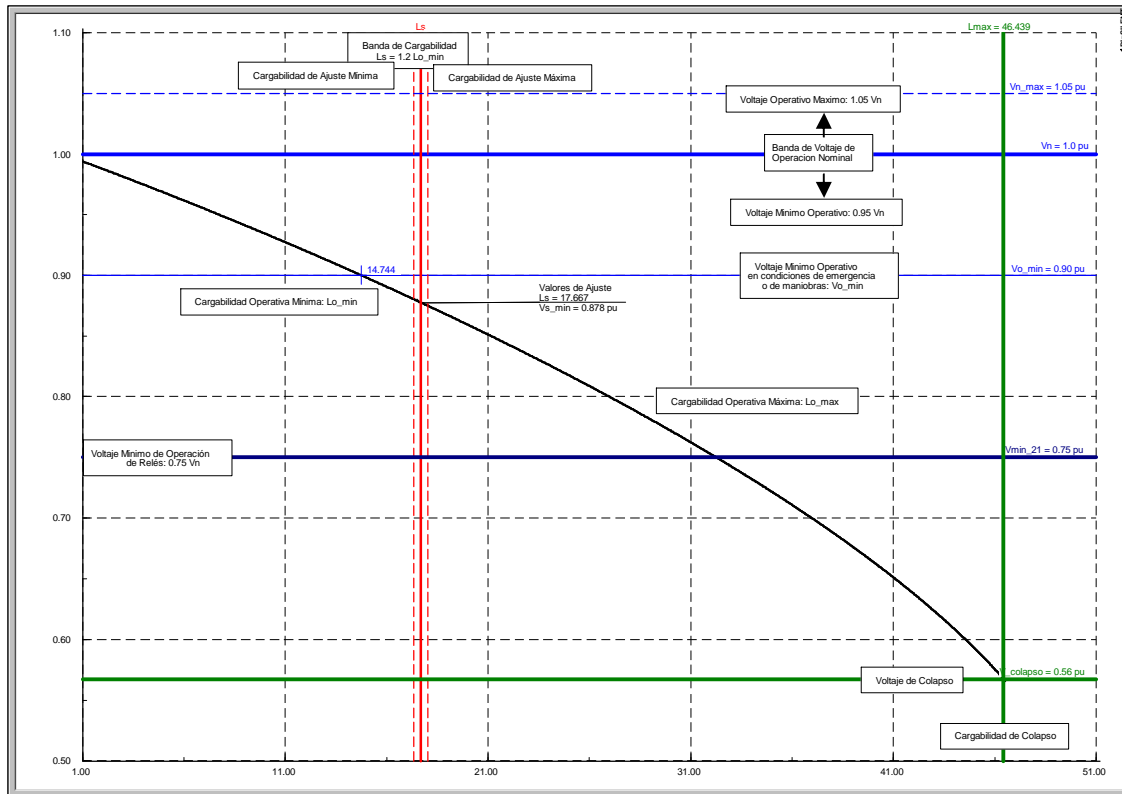


Figura 2. 24 Consideraciones generales y límites para definición del EACIV

Con los valores indicados se determina un valor del exponente de impedancia  $n = 1.069657$ , la simulación del IEVZ se indica en la figura 2.25.

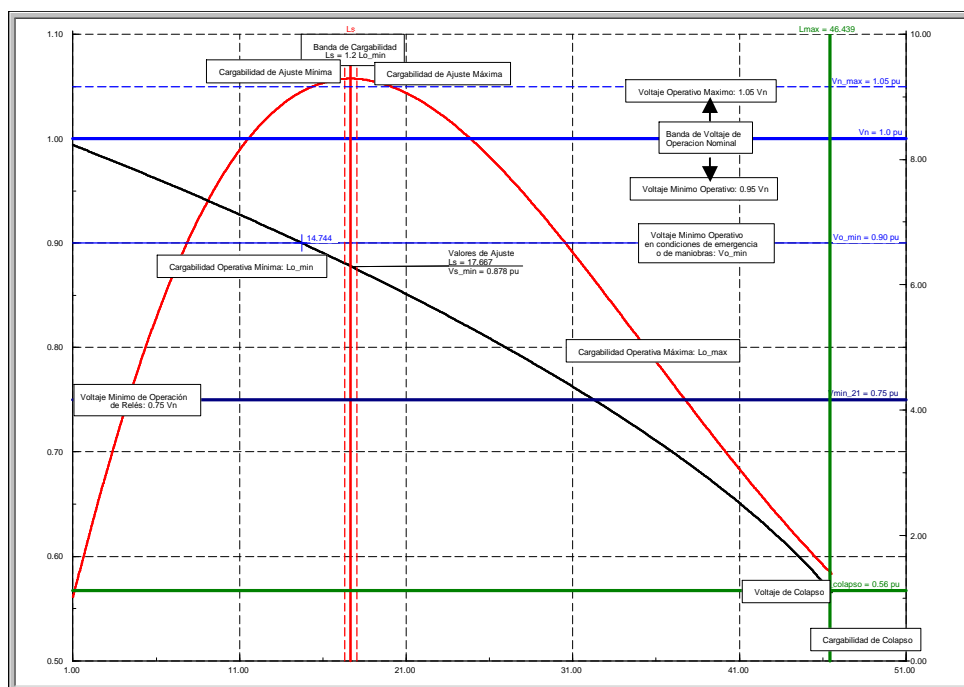


Figura 2. 25 Simulación del IEVZ



De esta manera también es posible establecer alarmas cuando el SEP se acerque a valores de cargabilidad preestablecidos como peligrosos o de alerta.

## **2.2.2 ANÁLISIS PRELIMINARES**

Adicionalmente deben desarrollarse análisis que validen el desempeño del EACIV planteado y establezcan ciertos lineamientos adicionales para el diseño y ajustes del esquema. Estos análisis corresponden a simulaciones en el dominio del tiempo, para esto se consideran paulatinamente diversas condiciones que pueden afectar el desempeño del EACIV. Estas condiciones comprenden fallas y contingencias. Con relación a las fallas, se consideran únicamente fallas trifásicas por cuanto las fallas desbalanceadas no afectarán la operación del EACIV debido al filtro de secuencia negativa propuesto en 2.2.1.

Los análisis siguientes se desarrollan considerando el modelo de carga ZIP y el planteo inicial del EACIV de ejemplo indicado en 2.2.1, es decir, manteniendo constante el exponente de impedancia  $n$  en 1.069657. Además considera una impedancia de 1 pu, entre la barra infinita y la barra de carga como valor nominal.

Se debe señalar que en simulación dinámica, el Power Factory, permite simular eventos de incremento de carga considerando los valores nominales de potencia activa y reactiva.

### **2.2.2.1 Análisis de contingencias**

#### ***2.2.2.1.1 Disminución de la máxima cargabilidad - aumento de la impedancia de la red: apertura de una L/T paralela***

Para el análisis de esta contingencia se considera la simulación de una apertura de una L/T que genera un aumento instantáneo de la impedancia de la red en un 100%, tal como se indica en la figura 2.26. La simulación considera el aumento de cargabilidad hasta 5 pu, en pasos de 1 pu por segundo; en este punto se simula el evento de apertura de la L/T paralela.

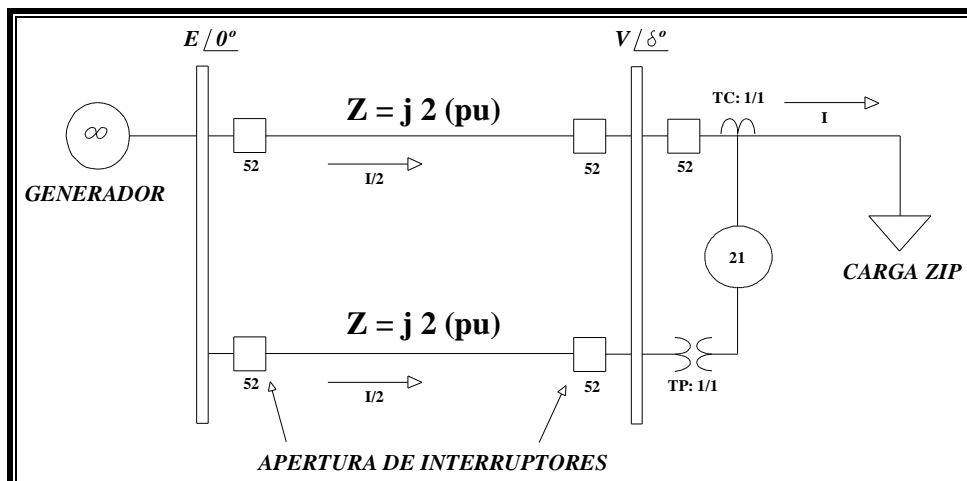


Figura 2. 26 Modelo para simulación del aumento de la impedancia de la red

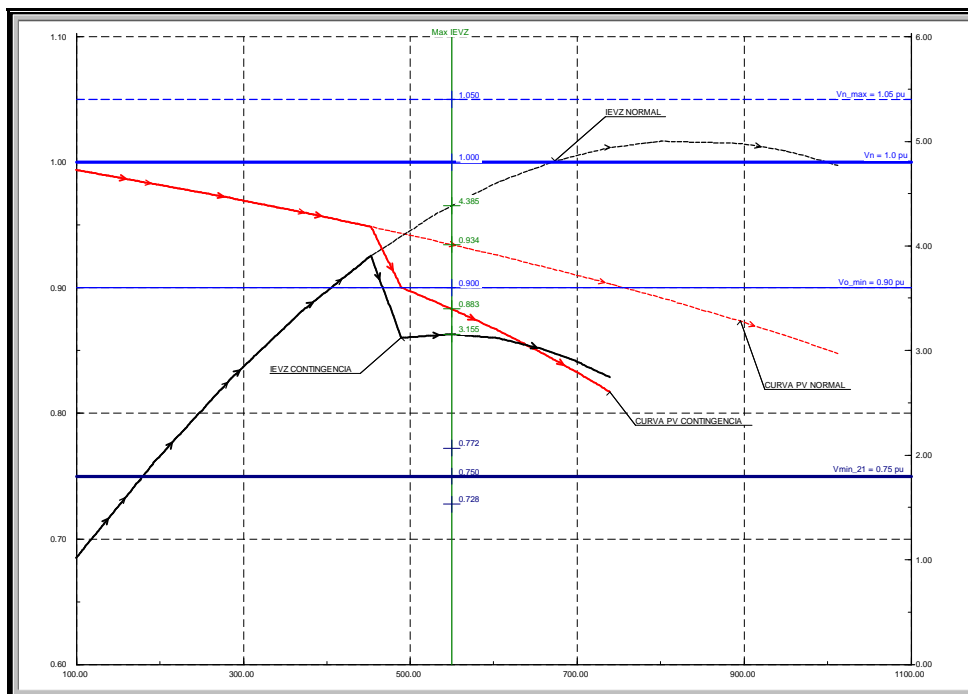


Figura 2. 27 Trayectoria del voltaje e IEVZ ante aumento de la impedancia de red

Se observa que la trayectoria del IEVZ sufre una discontinuidad producto de la contingencia, sin embargo, en su nueva trayectoria efectivamente genera una máximo en el valor de cargabilidad previsto como ajuste, el mismo que ocurre en un nivel de voltaje que se encuentra dentro de la banda de operación del EACIV.

La respuesta dinámica del IEVZ puede modificarse en presencia de un cortocircuito, a continuación se plantea analizar el comportamiento del IEVZ

ante el evento de falla y apertura de una L/T. Para el análisis de esta contingencia se considera la simulación de una falla trifásica al 50% de la L/T y su posterior apertura, considerando los siguientes escenarios:

- Apertura de la L/T en tiempo típico de protección principal (70 ms) y resistencias de fallas típicas de 0 y 5 ohms.
- Apertura de la L/T en tiempo típico de protección secundaria (200 ms) y resistencias de fallas típicas de 0 y 5 ohms.

La simulación considera un aumento de cargabilidad hasta 5 pu, en pasos de 1 pu por segundo; en este punto se simula el evento de falla y apertura de la L/T paralela.

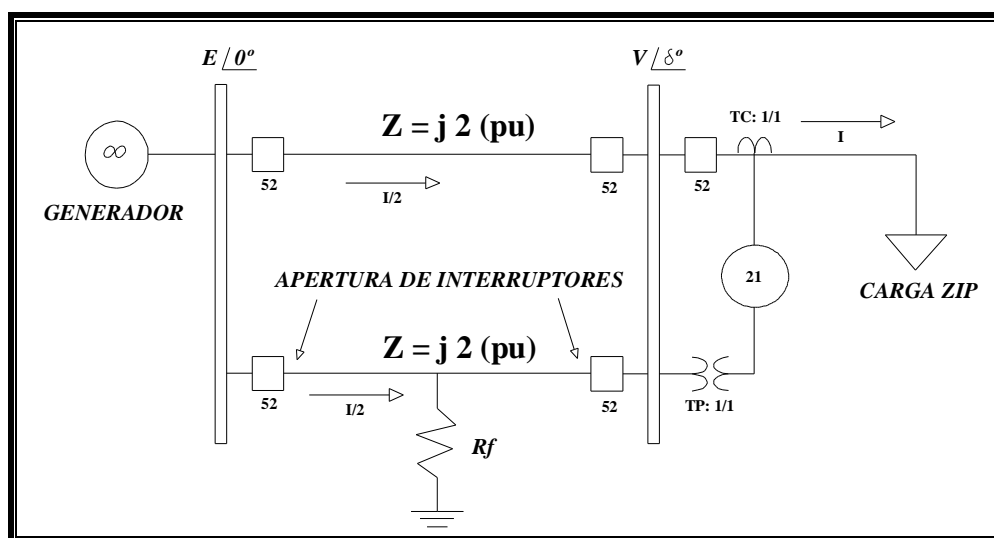
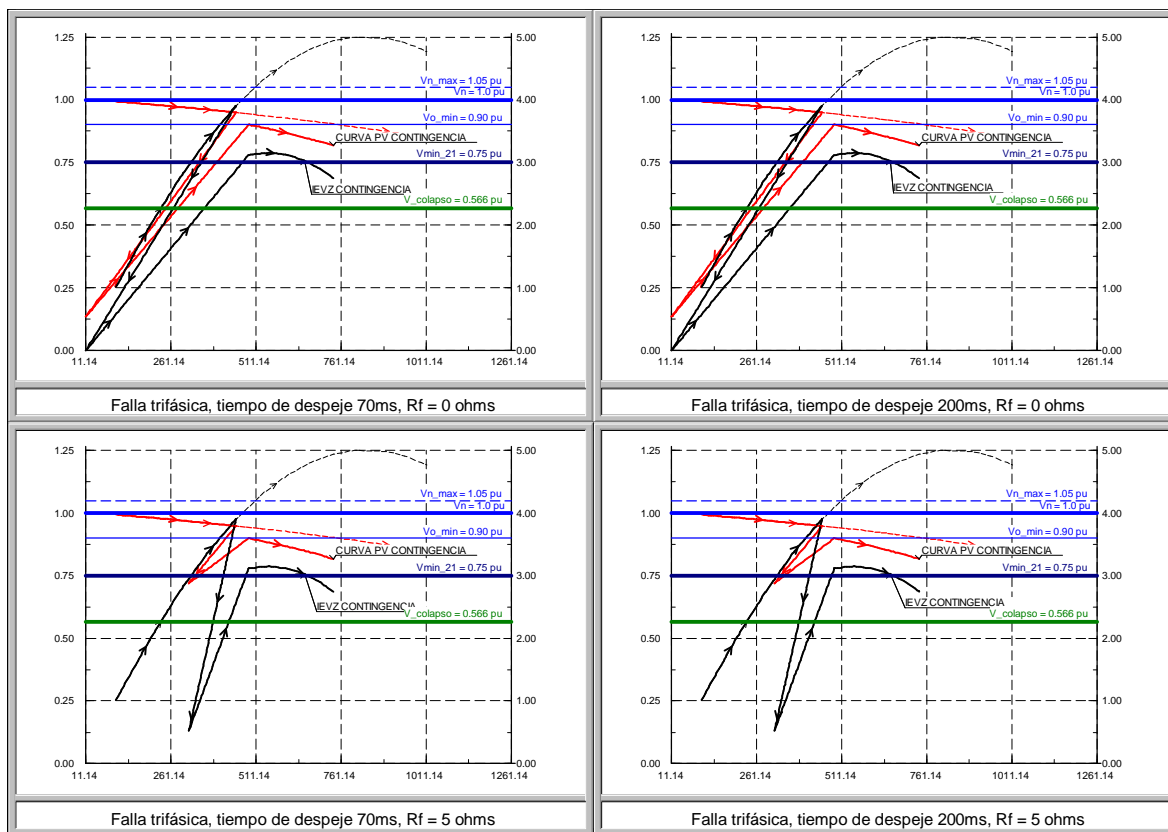


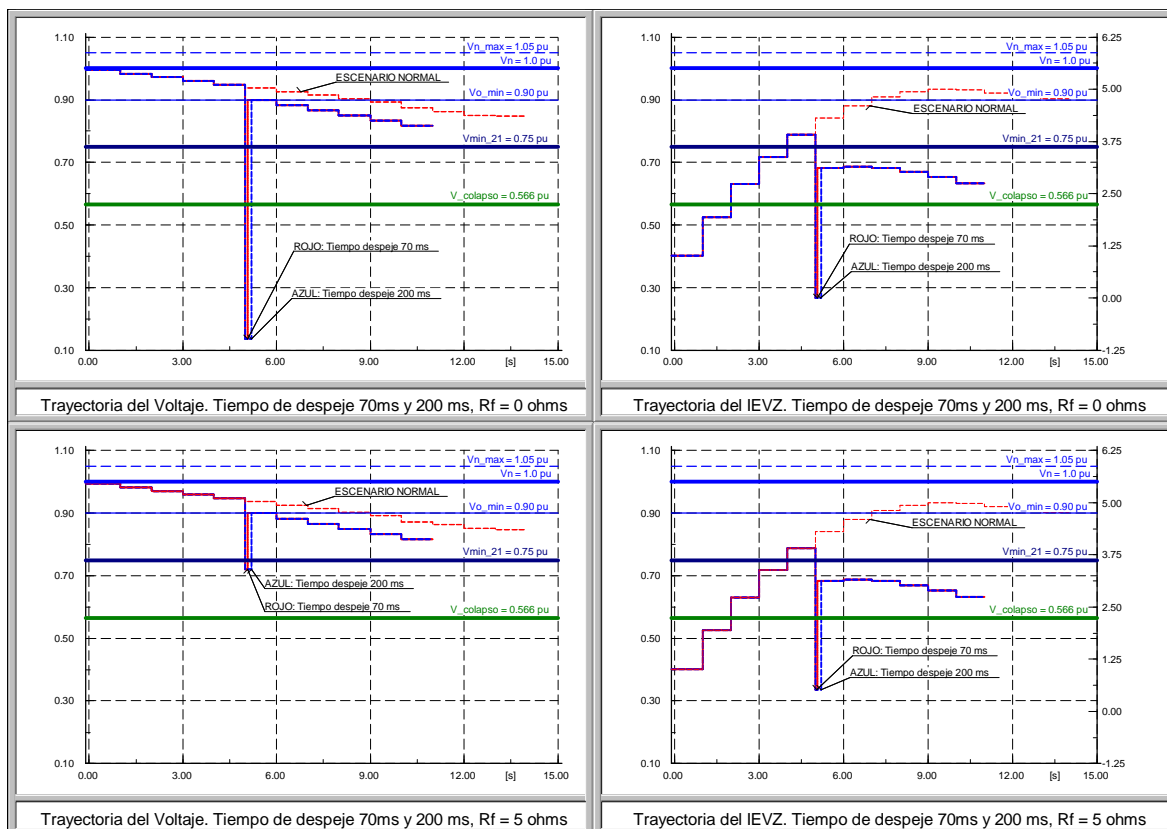
Figura 2. 28 Modelo para simulación del aumento de la impedancia de la red - simulación de cortocircuitos

En la figura 2.29 se presentan las simulaciones para la falla trifásica en los escenarios antes indicados.



**Figura 2. 29 Trayectoria del voltaje e IEVZ ante aumento de la impedancia de red - simulación de cortocircuitos**

Se observa que las trayectorias del voltaje y del IEVZ con respecto a la potencia transferida, difieren únicamente dependiendo de la impedancia de falla. El EACIV considera el monitoreo del IEVZ, en cuanto se genere un máximo de este parámetro, se establece el arranque del EACIV, sin embargo, la discontinuidad de la trayectoria del IEVZ ante contingencias puede ser interpretada como un máximo y activaría el EACIV. Para evitar esta situación es necesario analizar el comportamiento de las variables en el dominio del tiempo. A continuación se presentan las simulaciones considerando las trayectorias de voltaje e IEVZ con respecto al tiempo.



**Figura 2. 30 Trayectoria del voltaje e IEVZ ante aumento de la impedancia de red - simulación de cortocircuitos en el dominio del tiempo**

Se observa que ante la presencia de una falla trifásica se presenta un máximo IEVZ, sin embargo el nivel de voltaje sale de la banda de operación del EACIV, tanto para resistencias de falla de 0 y 5 ohms. Consecuentemente, el monitoreo adicional del nivel de voltaje, bloqueando el EACIV en niveles de voltaje bajos, permitirá discriminar entre una condición de falla trifásica y una de inestabilidad de voltaje.

Adicionalmente, se debe mencionar que ante una contingencia sin presencia de falla, figura 2.27, se presenta un máximo IEVZ y el voltaje es superior que cuando existen fallas, incluso puede estar dentro de la banda de operación normal considerando contingencias  $0.90V_n < V_n < 1.05V_n$ . Sin embargo, el EACIV no operaría por cuanto para que la operación de este sea efectiva requiere de las dos condiciones: voltaje inferior al ajuste y presencia de pendiente negativa del IEVZ.

### 2.2.2.1.2 Contingencia fuera de la impedancia de la red – falla y apertura de una L/T adyacente

Para el análisis de esta contingencia se considera la simulación de una falla trifásica al 50% de una L/T adyacente. Posterior se simula la apertura de la L/T en un tiempo típico de protección secundaria (200 ms), tal como se indica en la figura 2.31. La simulación considera el aumento de cargabilidad hasta 5 pu, en pasos de 1 pu por segundo; en este punto se simula el evento de falla y apertura de la L/T adyacente.

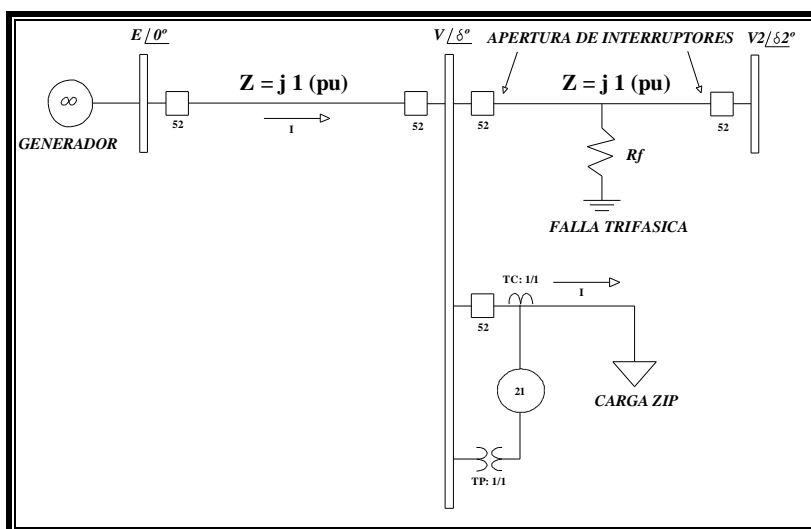


Figura 2. 31 Modelo para simulación de contingencias fuera de la impedancia de la red

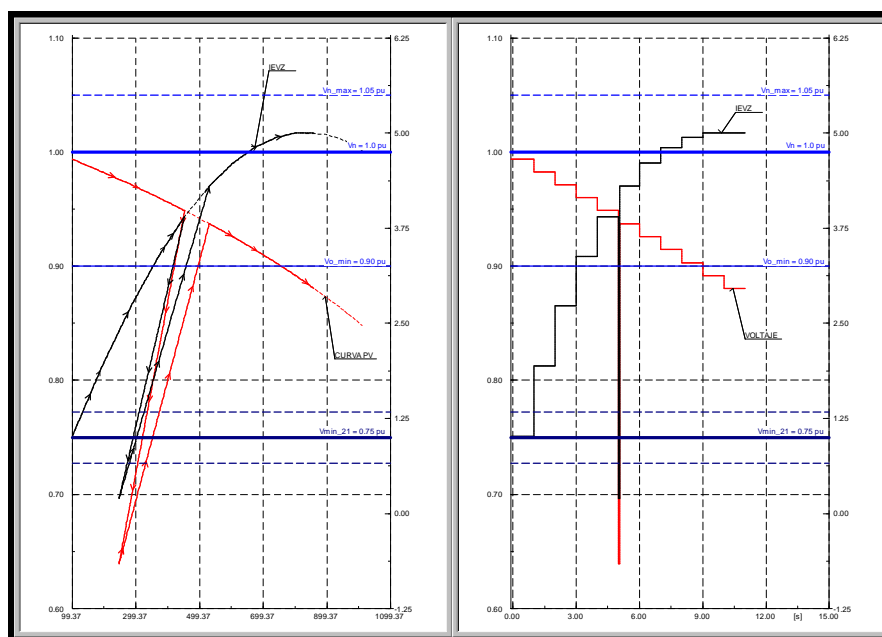


Figura 2. 32 Trayectoria del voltaje e IEVZ ante contingencias fuera de la impedancia de la red

Se observa que la trayectoria del IEVZ sufre una discontinuidad producto de la contingencia, sin embargo, posterior al despeje de la falla, recupera su trayectoria y efectivamente genera una máximo en el valor de cargabilidad previsto como ajuste, el mismo que ocurre en un nivel de voltaje que se encuentra dentro de la banda de operación del EACIV.

### 2.2.2.2 Análisis de estabilidad de larga escala

Dentro de los análisis de estabilidad de larga escala, se deben considerar los efectos dinámicos de restauración de la carga descritos en 1.4.2, es decir, se consideran los efectos de: dinámica de control del LTC, restauración de cargas termodinámicas y la respuesta de los motores, entre otros. Como se indicó en 1.4.2, estas consideraciones dinámicas de la carga pueden ser modeladas mediante diversos modelos genéricos propuestos por diversos autores. Dentro del Power Factory, se establece un modelo que considera a la carga dividida en un porcentaje de carga estática y un porcentaje de carga dinámica [13].

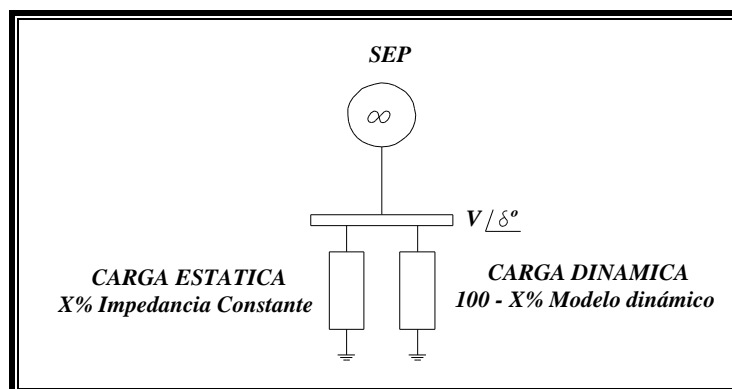


Figura 2. 33 Modelo dinámico de carga del Power Factory

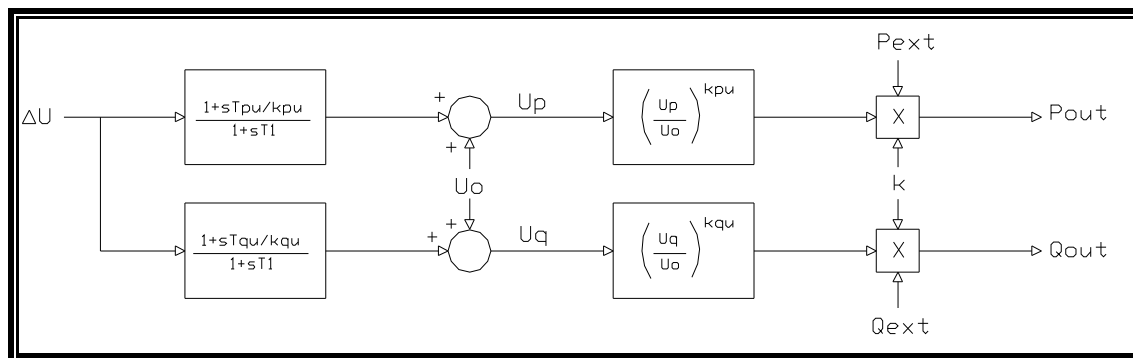
La carga estática es modelada como impedancia constante, mientras que la carga dinámica es modelada considerando la respuesta de la misma ante variaciones de frecuencia y/o voltaje. Dentro del presente estudio se considera la dependencia dinámica de la carga con respecto al voltaje únicamente.

Cuando la barra de carga experimenta una caída de voltaje  $\Delta V$ , la carga responde en su componente estático y dinámico de la siguiente manera:

- Carga estática: calcula la impedancia que representa su potencia al voltaje que existe inicialmente. El valor de potencia corresponde al determinado en función de su modelo de carga de estado estable: potencia, corriente o

impedancia constante. Posterior a la caída de voltaje la carga opera como modelo de impedancia constante.

- Carga dinámica: el porcentaje de carga dinámica sigue el modelo indicado en el diagrama de bloques de la figura 2.34.



**Figura 2. 34 Modelo de la característica dinámica de carga del Power Factory**

Donde  $k_{pu}$  y  $k_{qu}$ , representan la dependencia estable del voltaje para la potencia activa y reactiva, respectivamente. Estos exponentes corresponden a los exponentes de carga establecidos para los modelos de carga de estado estable. Los términos  $T_{pu}$  y  $T_{qu}$  representan la dependencia transitoria del voltaje de la carga activa y reactiva, respectivamente. El término  $T1$  corresponde a la constante de tiempo que expresa la velocidad de respuesta con la que la carga intenta restablecer la potencia a sus valores iniciales.

Se debe indicar que este modelo, como la mayoría de modelos de carga, representan un modelo para análisis ante variaciones de pequeña magnitud, por lo que está limitado a un rango de voltaje, normalmente desde 0.8 hasta 1.2 pu. Fuera de este rango se realiza una corrección en base a un factor de multiplicación  $k$  definido de la siguiente manera:



$$k = \begin{cases} \frac{2|u|^2}{u_{min}^2} : 0 < u < \frac{u_{min}}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{|u| - u_{min}}{u_{min}}\right)^2 : \frac{u_{min}}{2} < u < u_{min} \\ 1 : u_{min} < u < u_{max} \\ 1 + (u - u_{max})^2 : u > u_{max} \end{cases}$$

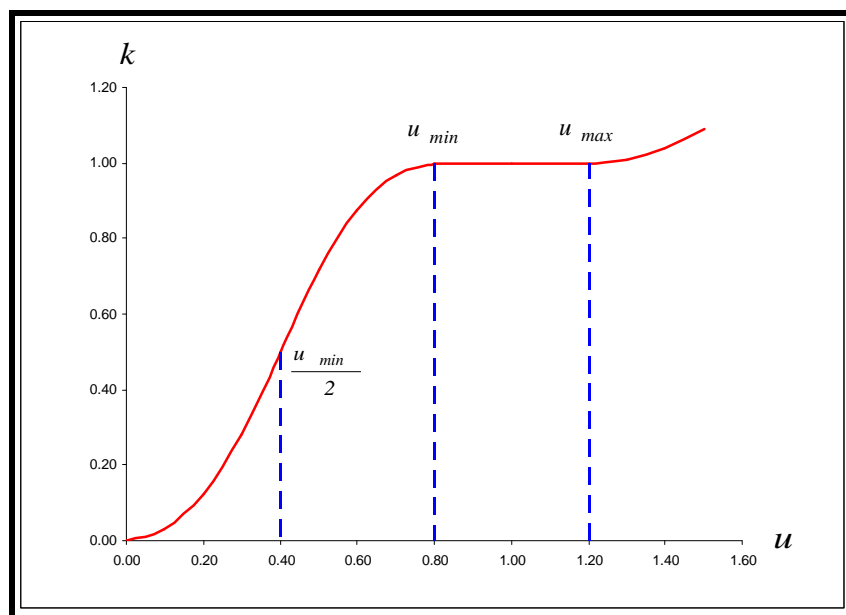
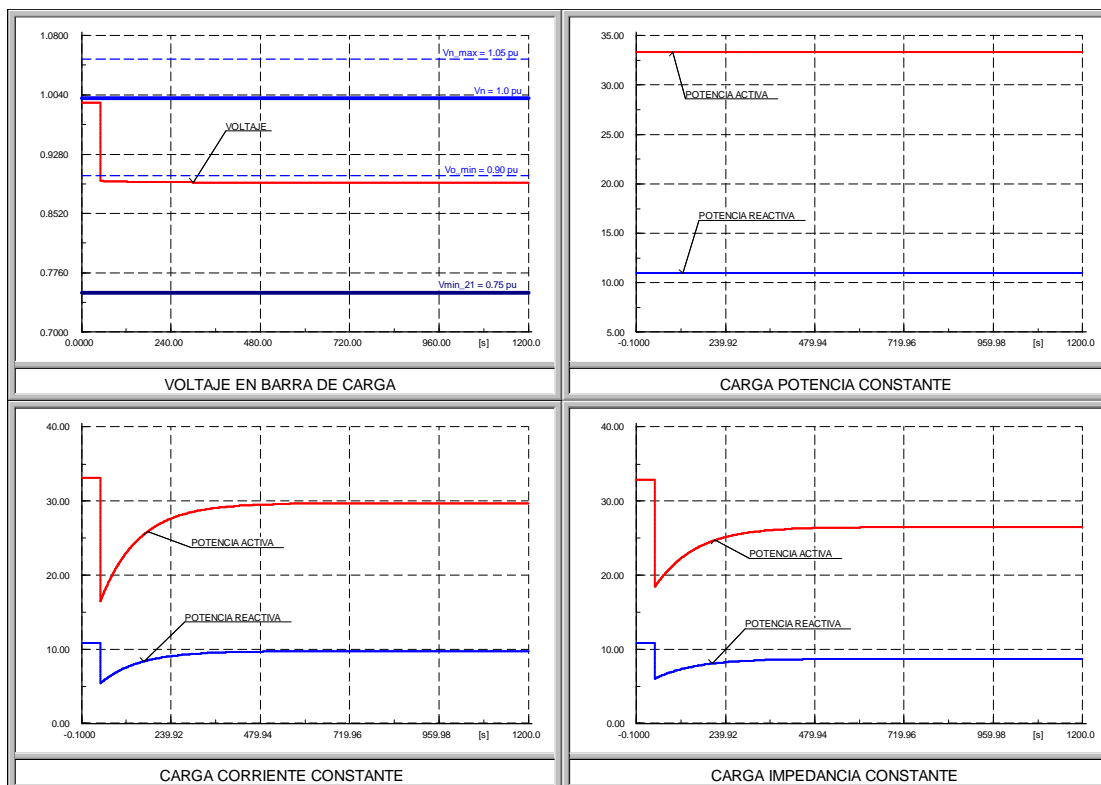


Figura 2. 35 Factor de multiplicación "k" para diversos valores de voltaje [13]

A continuación se presenta la simulación de una caída del 10% del voltaje en la barra de carga y la posterior restauración de la misma considerando cargas con 100% de componente dinámico y constantes  $T1 = 300$  s,  $Tpu = Tqu = 700$  s.



**Figura 2. 36 Respuesta dinámica de la carga ante una caída de voltaje**

**2.2.2.2.1 Evolución del IEVZ durante la restauración dinámica de la carga**

Como se había mencionado, la respuesta dinámica de la carga incide en el desempeño del IEVZ y consecuentemente del EACIV; especialmente en tiempos de análisis del orden de minutos, que es el rango de tiempo en el que las cargas superan el período transitorio y se estabilizan en un nuevo valor de manera permanente. Durante el proceso de restauración de la carga, es posible que la evolución del IEVZ genere un valor máximo, este valor debe ser analizado si efectivamente debe activar el EACIV.

A continuación se presenta la trayectoria del IEVZ durante la simulación planteada en el punto anterior, es decir, una caída del 10% del voltaje en la barra de carga y la posterior restauración de la misma considerando cargas con 100% de componente dinámico y constantes  $T1 = 300$  s,  $Tpu = Tqu = 700$  s.

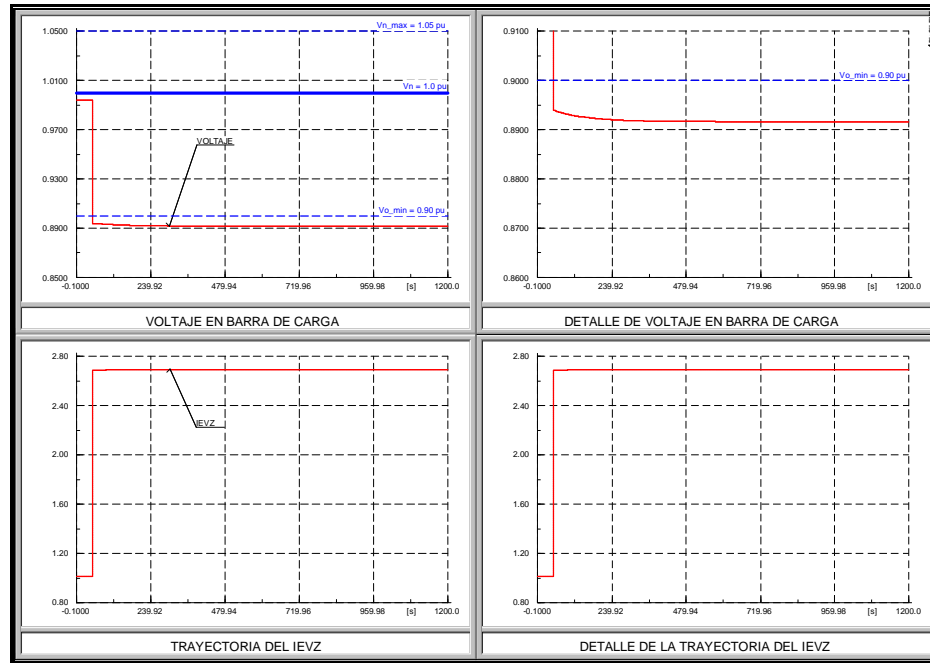
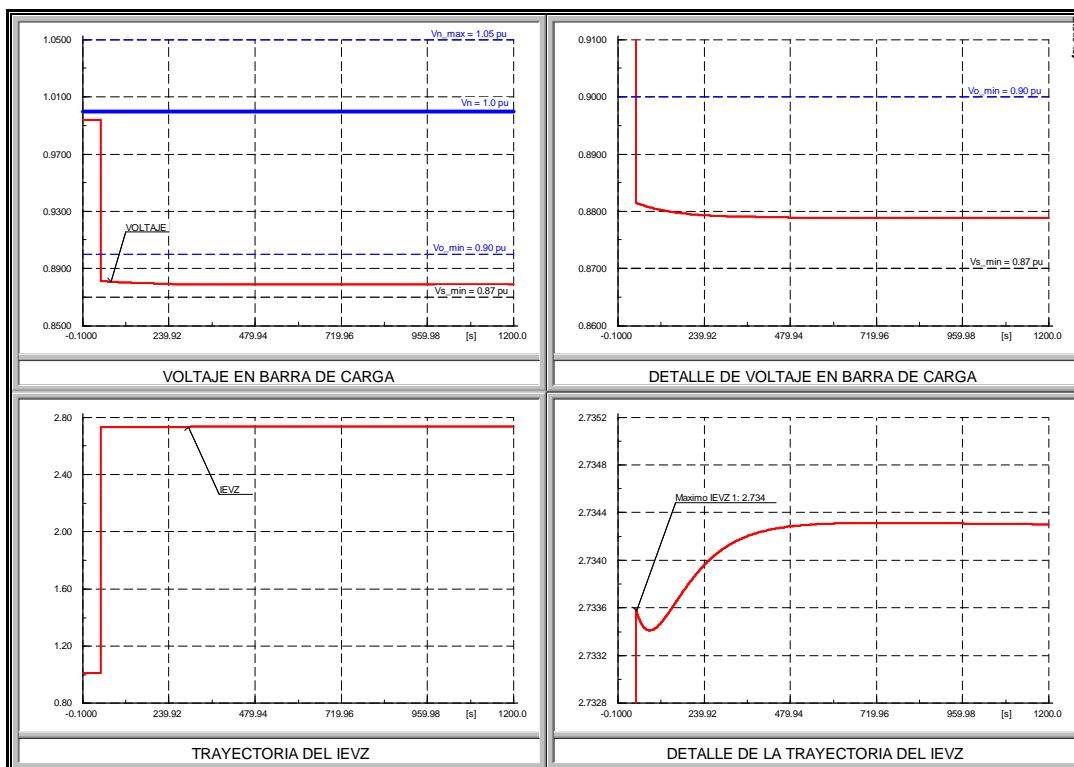


Figura 2. 37 Trayectoria del IEVZ ante una caída de voltaje  $T1 = 300s$ ,  $Tpu = Tqu = 700s$

Como se había indicado, es posible que durante la restauración de la carga se genere un máximo IEVZ; a continuación se presenta la simulación de una caída del voltaje cercano al voltaje mínimo de ajuste ( $V_{s\_min}$ ) en la barra de carga y la posterior restauración de la misma considerando cargas con 100% de componente dinámico y constantes  $T1 = 100 s$ ,  $Tpu = Tqu = 500 s$ .



**Figura 2. 38 Trayectoria del IEVZ ante una caída de voltaje  $T1 = 100s$ ,  $Tpu = Tqu = 500s$**

Se observa que efectivamente se presenta un máximo IEVZ al inicio del evento, sin embargo el arranque efectivo del EACIV se producirá siempre que el voltaje se encuentre por debajo del voltaje mínimo de ajuste ( $V_{s\_min}$ ), y que se haya superado el período transitorio para lo cual se utiliza una temporización en el arranque efectivo de monitoreo del IEVZ del orden de 3 a 10 segundos [14].

### 2.2.3 METODOLOGÍA PLANTEADA PARA EL EACIV

Dentro de la definición del algoritmo para un EACIV se debe señalar que el mismo, por definición, dependerá del sistema de potencia bajo estudio, por cuanto cada sistema tiene diferentes características que afectan directamente en la respuesta de estado estable y dinámica, tanto en operación normal como frente a contingencias. Consecuentemente, el modelamiento del SEP es de extrema importancia para un buen desempeño del EACIV, especialmente lo relacionado con el modelo dinámico de la carga que debe ser definido sobre la base de registros reales de comportamiento de la misma ante variaciones de voltaje, especialmente.

Bajo estas premisas, a continuación se exponen lineamientos generales para el ajuste y parametrización del EACIV, considerando como concepto central la posibilidad de generar valores máximos del IEVZ en valores de cargabilidad predefinidos mediante estudios. El esquema general para establecer un EACIV mediante monitoreo del IEVZ se indica en la figura 2.39.

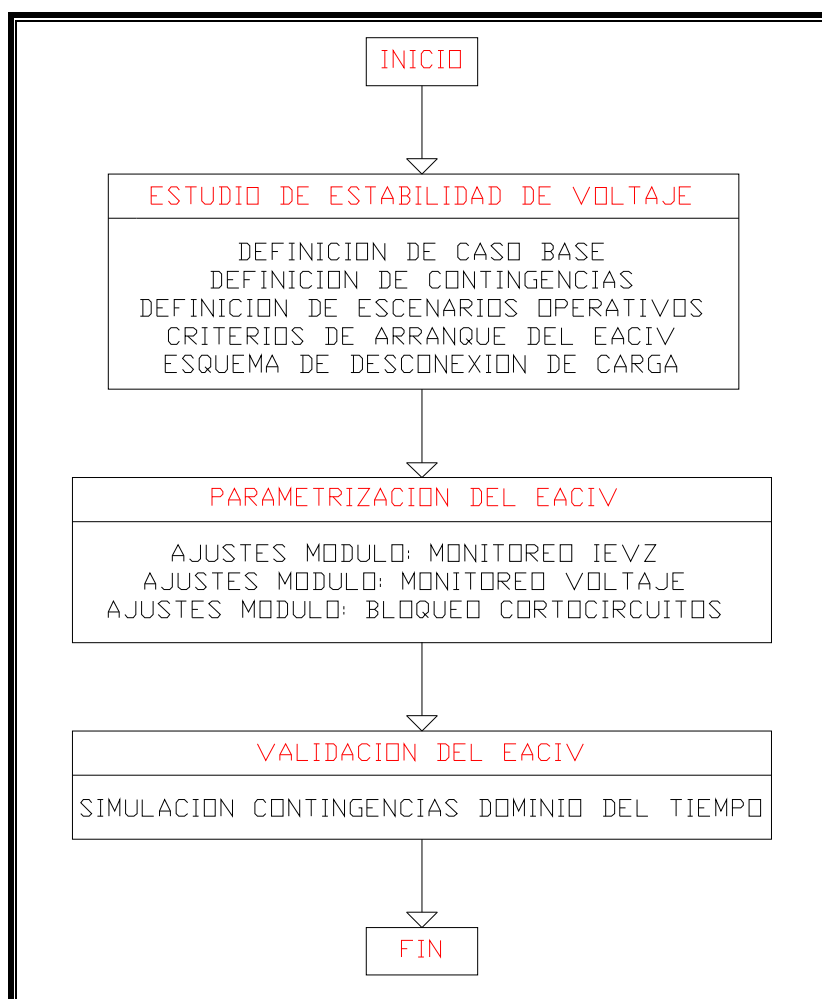


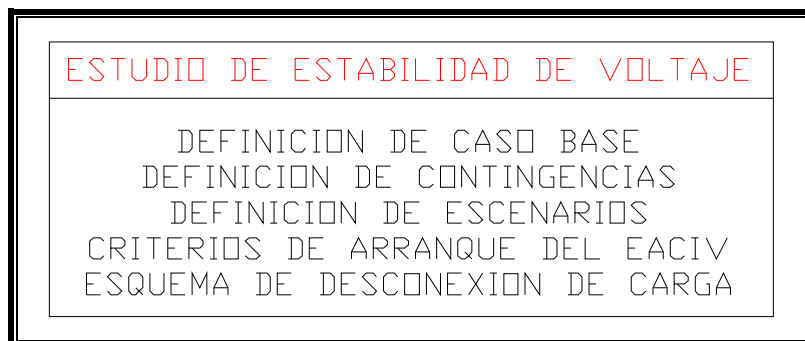
Figura 2. 39 Esquema general para el EACIV mediante monitoreo del IEVZ

A continuación se realiza una descripción de estos bloques.

### 2.2.3.1 Estudio de Estabilidad de Voltaje

El estudio de estabilidad de voltaje se enmarca en la determinación del caso base, los escenarios operativos probables y la definición de las contingencias que se produzcan en el SEP que puedan conllevar a una inestabilidad de voltaje.

Adicionalmente, se plantea establecer los criterios de arranque así como el esquema de desconexión de carga del EACIV.



**Figura 2. 40 Bloque Estudio de Estabilidad de Voltaje**

#### ***2.2.3.1.1 Definición del Caso Base***

La definición del caso base debe llevarse a cabo considerando las condiciones topológicas y energéticas previstas en el planeamiento operativo de mediano plazo. Es decir, deben considerarse escenarios macros en los que el SEP establecerá su operación y sobre los cuales se desarrollan los escenarios de corto plazo. Por ejemplo, en el SEP ecuatoriano, se establecen dos escenarios macros generalmente ligados a las condiciones del sistema de generación: alta y baja hidrología, sobre éstos se definen los escenarios de corto plazo generalmente ligados a las condiciones de la carga: máxima, media y mínima demanda. Adicionalmente, deben considerarse las condiciones de disponibilidad y mantenimientos de los diversos componentes del SEP.

Una vez definido el caso base, mediante la herramienta de flujos de continuación, es posible determinar la curva PV del mismo; y considerando los rangos de voltajes de operación normal, generalmente establecidos en los procedimientos de operación, es posible conocer los niveles de máxima cargabilidad a los que puede ser sometido el SEP.

#### ***2.2.3.1.2 Definición de Contingencias***

La definición de las contingencias debe llevarse a cabo considerando los lineamientos operativos con los cuales se planifica la operación en tiempo real del SEP. Dentro de estos lineamientos se encuentran:

- Rangos de voltajes de operación normal y ante contingencias, generalmente establecidos en los procedimientos de operación.
- Nivel de confiabilidad considerado en la planificación operativa, generalmente es utilizado el concepto del  $n-1$ , es decir, que el SEP debe mantenerse estable y con sus variables dentro de los rangos normales de operación, cuando uno de cualquiera de los elementos que conforman el SEP sea removido del mismo.

Con estos lineamientos, se definen las contingencias más realistas que se producirían en el SEP y que conlleven a una inestabilidad de voltaje. De manera general, es posible definir dos tipos de contingencias [14]:

- **Contingencias inestables de corta escala:** Son las contingencias en la que se llega a un colapso de voltaje de manera rápida, en el orden de segundos. Generalmente estas contingencias están ligadas a la no existencia de una solución de flujo de carga post-contingencia. Esto implica una operación no segura del SEP, es decir, que el planeamiento operativo no cumple con un nivel de confiabilidad adecuado. Ante estos eventos es complicado establecer un esquema de desconexión de carga por voltaje, por cuanto el voltaje tendrá un comportamiento extremadamente variable y no permitiría esclarecer si el fenómeno está relacionado con una inestabilidad de voltaje. Debido a que ante estos eventos se presentan también rápidas variaciones de ángulo y/o frecuencia, para mitigar los efectos de estas contingencias, se tienen mecanismos rápidos basados en el análisis dinámico de estas variables como: oscilación de potencia, fuera de paso y/o desconexión de carga por frecuencia, entre otros. Por esta razón, ante inestabilidad transitoria (0 a 3 segundos) el EACIV's puede no actuar, debido a su bloqueo mediante temporización para superar el estado transitorio de cualquier contingencia que pueda generar un falso máximo del IEVZ. Sin embargo, y si se cumplen todas las condiciones necesarias para el EACIV, este operaría colaborando en lo posible a disminuir la inestabilidad generada.

- **Contingencias inestables de larga escala:** Son las contingencias en las que se llega a un colapso de voltaje en un lapso de tiempo desde las decenas de segundos en adelante. Cuando ocurre una contingencia de este tipo, el SEP encuentra un nuevo punto de operación, lo que implica que existe solución al flujo de carga post-contingencia. Posteriormente, y debido a incrementos de carga y a la dinámica de los elementos del SEP el punto de operación se desplaza por la trayectoria definida por la curva PV post-contingencia pudiendo alcanzar una bifurcación tipo “silla” o a una bifurcación inducida por límites, produciéndose de esta manera el colapso de voltaje. Ante estas contingencias es posible establecer un EACIV que permite al SEP mantenerse lo suficientemente alejado del colapso.

En resumen, una contingencia puede ser: estable o inestable, a su vez una contingencia inestable puede ser de corta o larga escala, esto dependerá, entre otros factores, de la definición de escenarios operativos que se desarrolla a continuación.

#### **2.2.3.1.3 Definición de Escenarios Operativos y Contingencias Críticas**

Como se indica en 2.2.3.1.1, los escenarios corresponden a condiciones de corto plazo y consecuentemente de mayor detalle en cuanto a la información de despacho de generación y carga. De manera general, éstos se definen mediante la determinación de la solución del flujo de potencia para un momento específico en el tiempo, y corresponderán a las condiciones iniciales de estado estable del SEP, desde donde ocurrirán las contingencias.



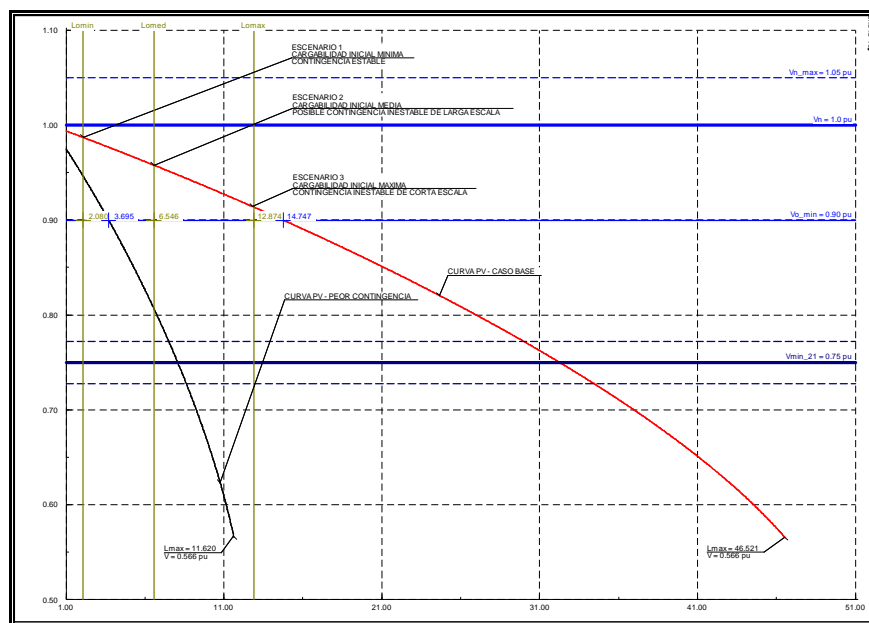


Figura 2. 41 Escenarios operativos y contingencias críticas

En la figura 2.41 se observa que, partiendo del mismo caso base y dependiendo del escenario planteado, se pueden tener los tres tipos de contingencias indicados en 2.2.3.1.2.

El EACIV será diseñado para cubrir el tercer tipo de contingencias, es decir, para las contingencias que puedan generar una inestabilidad de voltaje de larga escala; y, como se había indicado, para las contingencias que generen una inestabilidad de voltaje de corta escala el EACIV puede o no operar, mientras que para las contingencias estables el EACIV no debe operar.

Para el objetivo planteado, que corresponde al ajuste, parametrización y validación del EACIV, se requiere establecer el peor escenario que, sobre las curvas PV del caso base y de la peor contingencia, genere una inestabilidad de voltaje de larga escala.

#### 2.2.3.1.4 Criterios de arranque del EACIV

Una vez establecido: caso base, peor contingencia y peor escenario, es posible definir los criterios con los que arrancará el EACIV. En general, el concepto es que el SEP se encuentre operando dentro de una zona segura aún ante contingencias, si el SEP se acerca a un punto de cargabilidad preestablecido

como peligroso, el EACIV actúa desconectando carga y regresando al SEP, en lo posible, a la zona segura de operación.

Otro elemento importante que establece el ajuste de cargabilidad es la banda de voltaje de operación normal y ante contingencias, generalmente definida entre  $0.90V_n < V_n < 1.05V_n$ , sin embargo, y dependiendo de las características del SEP esta banda puede variar. Si el SEP experimenta voltajes por fuera de esta banda, el EACIV debe actuar para evitar incursiones en zonas inestables y/u oscilatorias.

Consecuentemente el criterio de arranque del EACIV debe definirse analizando entre un porcentaje de la cargabilidad máxima, establecida en la curva PV, y el monitoreo del voltaje.

#### ***2.2.3.1.5 Esquema de desconexión de carga***

Dentro de la definición del algoritmo para el EACIV basado en el monitoreo del IEVZ, se deben tomar en cuenta ciertas consideraciones relacionadas con el procedimiento a seguirse para establecer el tipo y cantidad de carga a desconectarse. Se recuerda que el EACIV por definición corresponde a un mecanismo de última defensa ante inestabilidades de voltaje de larga escala, por lo que su marco referencial de arranque en tiempo es de 3 a 10 segundos.

La estabilidad de voltaje es un fenómeno local, por lo que se debe establecer islas eléctricas dentro del SEP en donde se analicen y apliquen el EACIV. Por otra parte, y en base a las características de la carga se debe definir que cargas serán las primeras en ser desconectadas dentro del EACIV. Cargas con gran consumo de reactivos tienen prioridad en su desconexión para evitar el colapso.

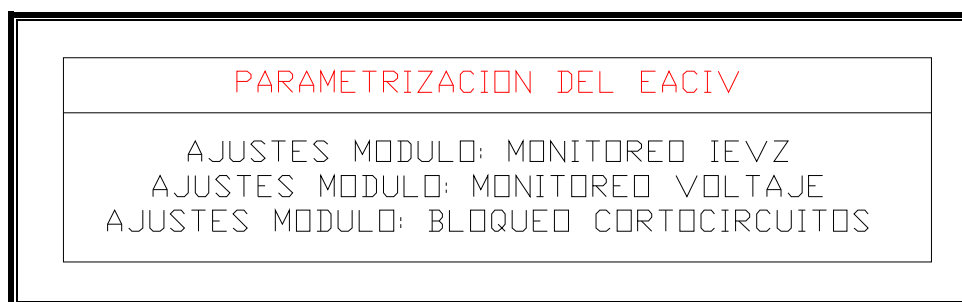
Considerando estos aspectos, el EACIV será inherentemente multi - pasos, es decir, que en su diseño existirán diferentes ajustes de arranque y diferentes pasos de desconexión de carga. Al tener diferentes ajustes de arranque se puede dar una cobertura de las islas que conforman el SEP, por cuanto cada una tendrá diversos niveles de voltajes; mientras que al tener diferentes pasos de desconexión de carga se podrá generar selectividad entre la carga a

desconectarse. Se debe mencionar que el EACIV puede también considerar la activación de alarmas cuando el SEP se acerque a valores de cargabilidad preestablecidos como peligrosos o de alerta.

Con relación a la cantidad de carga a desconectarse, ésta debe ser lo suficiente para regresar al SEP a los niveles de voltaje establecidos como de operación normal. Al respecto se han desarrollado esquemas y algoritmos para establecer el monto de carga a desconectarse basados en el monitoreo e integración de la señal de voltaje con respecto al tiempo [15].

### 2.2.3.2 Parametrización del EACIV

En la figura 2.42, se expone el diagrama de flujo planteado para la parametrización y ajustes del bloque: "Monitoreo del IEVZ". Este diagrama establece la parametrización para generar un máximo IEVZ en los valores de cargabilidad establecidos en el estudio de estabilidad de voltaje, por lo que, si el EACIV es multipaso, por cada ajuste o paso planteado se debe desarrollar el esquema de la figura 2.42.

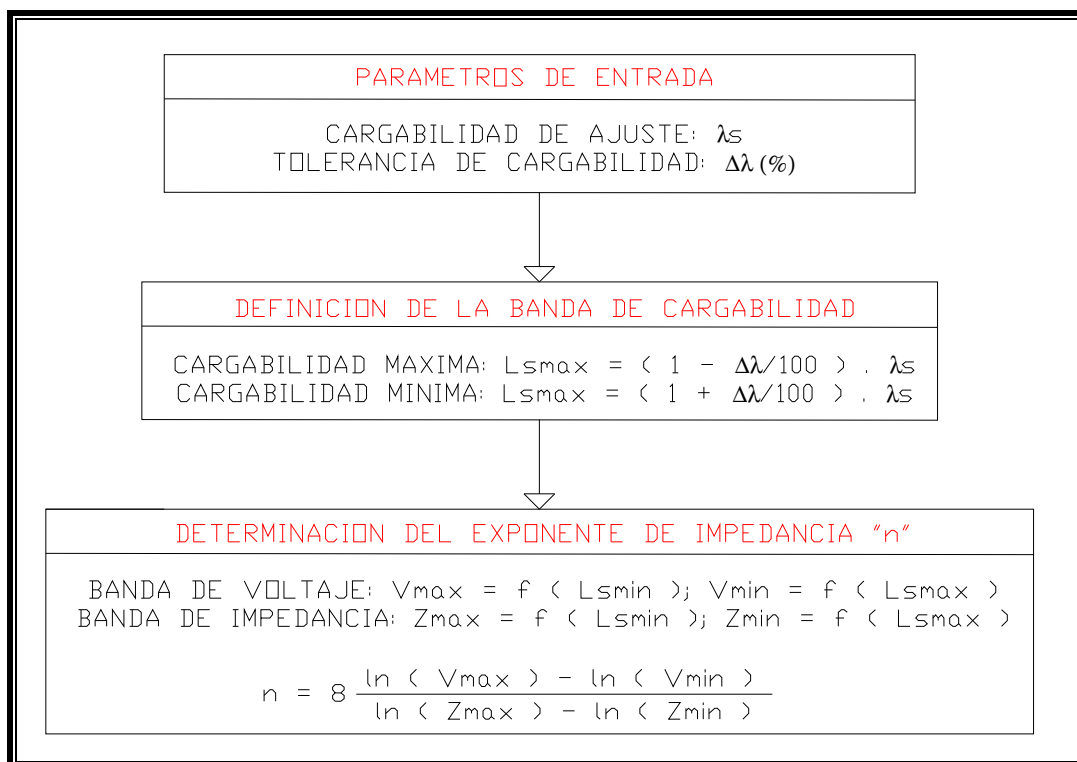


**Figura 2. 42 Bloque Parametrización del EACIV**

Como parámetro de entrada se establece un valor de cargabilidad de ajuste  $\lambda_s$  para cada ajuste planteado.

#### 2.2.3.2.1 Ajustes Módulo: *MONITOREO IEVZ*

En la figura 56, se expone el diagrama de flujo planteado para la parametrización del módulo MONITOREO IEVZ.

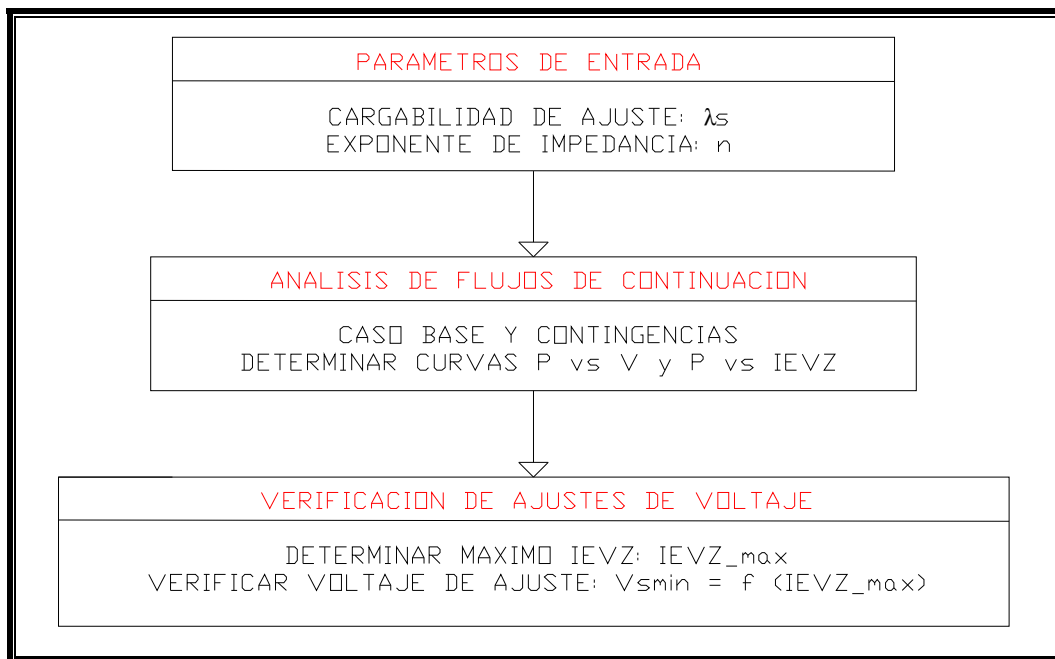


**Figura 2. 43 Bloque Monitoreo IEVZ**

Se recuerda que para la determinación del exponente de impedancia “n” se requiere definir una banda de cargabilidad la misma que se establece como un rango porcentual  $\Delta\lambda$ , alrededor de un valor de cargabilidad específico  $\lambda_s$ , este rango porcentual, requerido únicamente para el cálculo de “n”, puede ser considerado entre 2 y 5 %.

#### **2.2.3.2.2 Ajustes Módulo: MONITOREO VOLTAJE**

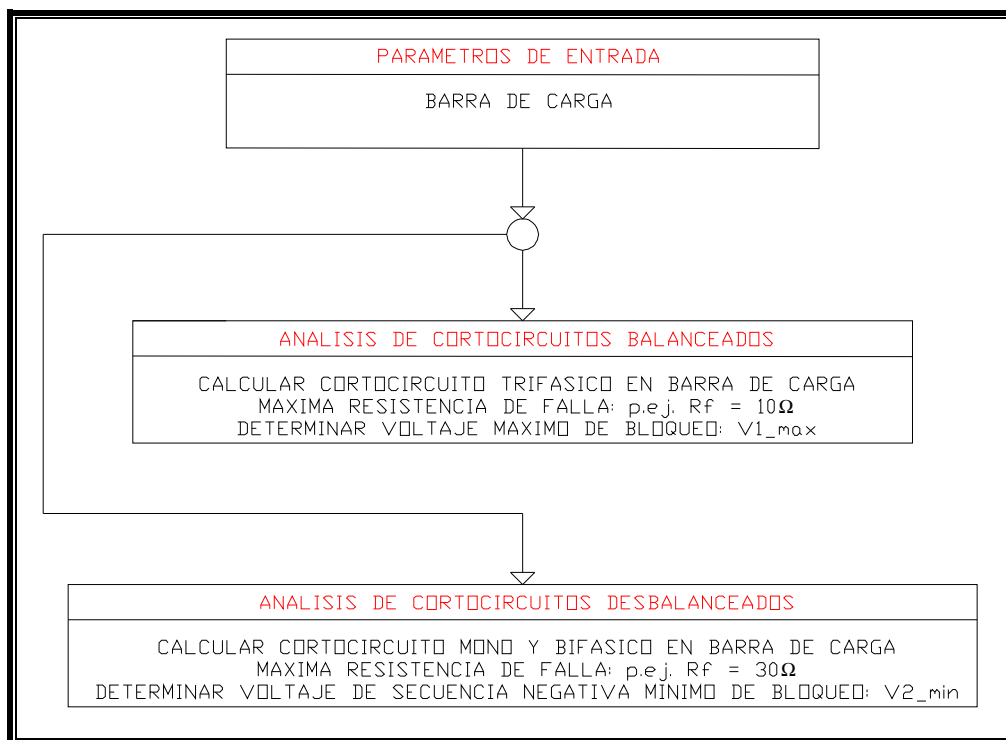
En la figura 2.44, se expone el diagrama de flujo planteado para la parametrización del módulo MONITOREO VOLTAJE.



**Figura 2. 44 Bloque Monitoreo Voltaje**

### 2.2.3.2.3 Ajustes Módulo: BLOQUEO CORTOCIRCUITOS

En la figura 2.45, se expone el diagrama de flujo planteado para la parametrización del módulo BLOQUEO CORTOCIRCUITOS.



**Figura 2. 45 Bloque Bloqueo Cortocircuitos**

### 2.2.3.3 Validación del EACIV

En la figura 2.46, se expone el diagrama de flujo planteado para el bloque Validación del EACIV.



**Figura 2. 46 Bloque validación del EACIV**

La validación del EACIV comprende análisis en estado estable y en el dominio del tiempo, el análisis en estado estable es realizado mediante flujos de continuación utilizando modelos de carga sensibles al voltaje y acciones de control interactuando dentro del flujo de carga. Con esta herramienta es posible simular el escenario de un colapso de voltaje, y por medio de los modelos de carga es posible modificar la velocidad del colapso. De esta manera es posible definir ciertas características del EACIV, sin embargo la simulación dinámica resulta en la mejor herramienta para validar el desempeño del EACIV.

El EACIV debe ser estudiado considerando considerando la actuación de los relés de desconexión de carga así como de importantes acciones de control como:

- Control de reactivos de generación
- Actuación o bloqueo de LTC's
- Conexión automática de capacitores o reactores, actuación de SVC's
- Actuación de otros sistemas de protección, como relés de distancia.

Debido a que las simulaciones dinámicas requieren de mayor tiempo de procesamiento, la mayor parte del trabajo es realizado mediante análisis de estado estable y confirmación futura mediante análisis dinámico.

## **2.3 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PLANTEADA A LA RED EJEMPLO IEEE 14 BARRAS**

A continuación se plantea desarrollar el EACIV basado en el monitoreo del IEVZ para el sistema IEEE de 14 barras, este sistema ha sido estudiado en diversos documentos y por diversos autores, los que han desarrollado análisis desde el punto de vista de estabilidad de voltaje y ángulo. Desde el punto de vista de estabilidad de voltaje el sistema permite analizar los diferentes tipos de contingencias indicados en 2.2.3.1, por lo que resulta adecuado para el planteamiento del EACIV.

En [16] y [17] se desarrolla el análisis de estabilidad de voltaje determinando las curvas PV para los casos base y peores probables simples contingencias. Para el presente estudio se considerarán el caso base y las contingencias establecidas en estos documentos.

### **2.3.1 CARACTERÍSTICAS Y MODELACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA**

En la figura 2.47 se indica el diagrama unifilar del sistema bajo estudio, la información relacionada a los parámetros de cada uno de los componentes del SEP se detalla en el Anexo B.

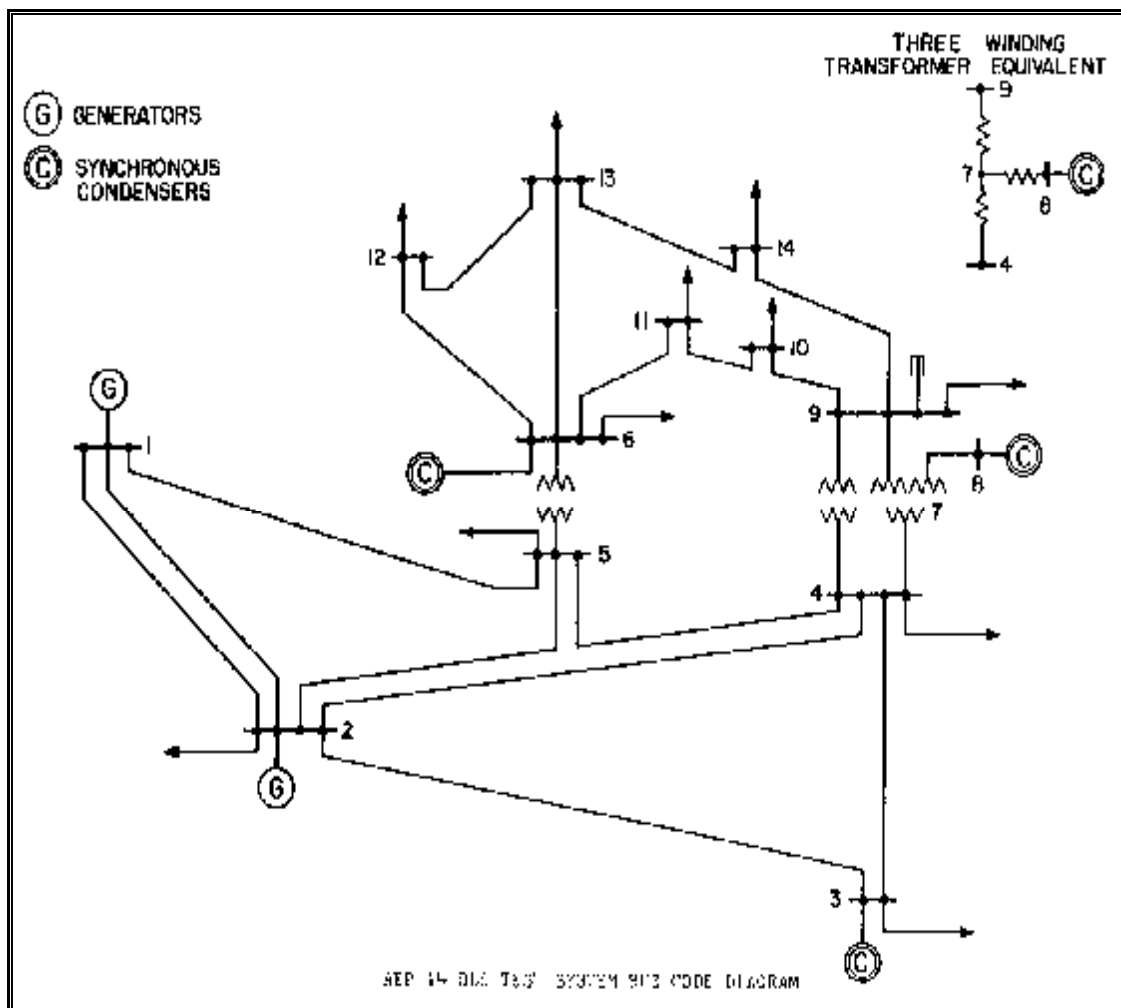


Figura 2. 47 Diagrama unifilar del sistema IEEE 14 barras

## 2.3.2 ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE

### 2.3.2.1 Definición del caso base.

El sistema IEEE de 14 barras ha sido implementado en Power Factory como se indica en la figura 2.48, la misma que detalla la solución del flujo de carga para el caso base. En esta modelación se considera una potencia base de 100 MVA y voltajes base de 230, 60 y 46 kV, tal como se indica en el Anexo B.



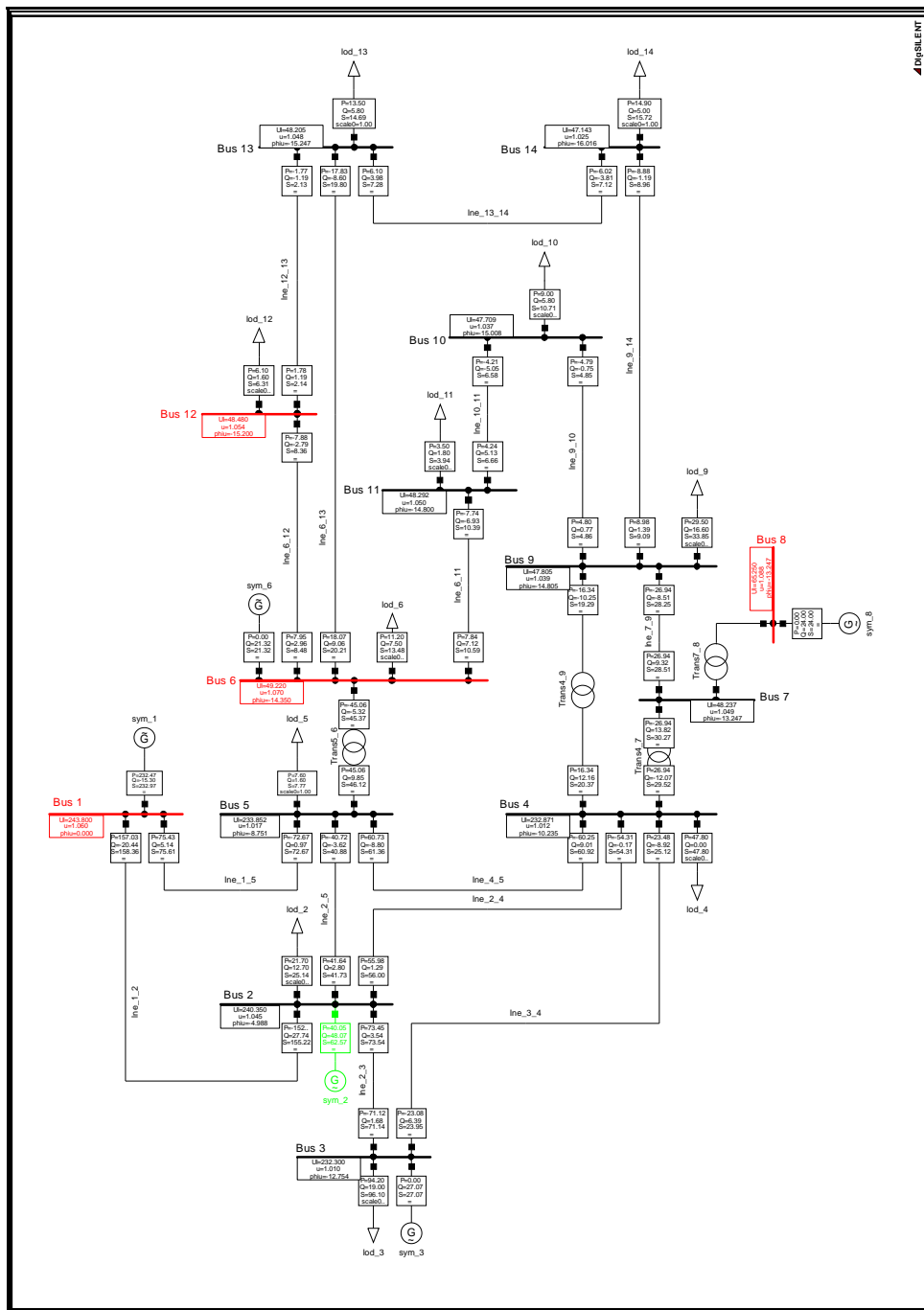


Figura 2. 48 Flujo de carga para el caso base IEEE 14 barras

La información desplegada en los generadores, cargas y líneas de transmisión corresponde a potencias: activa (MW), reactiva (Mvar) y aparente (MVA), así como el valor de escalamiento únicamente en el caso de cargas. Con relación a las barras en éstas se indican: voltaje línea a línea en kV y en pu, así como el ángulo en grados.

Se debe señalar que el modelo de carga utilizado corresponde al más desfavorable desde el punto de vista de estabilidad de voltaje, es decir, se considera una carga de potencia constante.

Adicionalmente, el flujo de carga considera el concepto de barra slack distribuida entre las barras que conectan a los generadores 1 y 2, esta condición permite distribuir de una manera más realista la potencia activa generada y requerida por el SEP, tal como se plantea en [17]. Para ello se utiliza la distribución de potencia indicada en el Anexo B.

Se debe mencionar que también se consideran los límites de potencia reactiva de los generadores dentro del proceso de solución del flujo de carga. El flujo de carga es resuelto mediante el método de Newton – Raphson completo.

Utilizando los flujos de continuación es posible determinar la curva PV del caso base, tal como se indica en la figura 2.49.

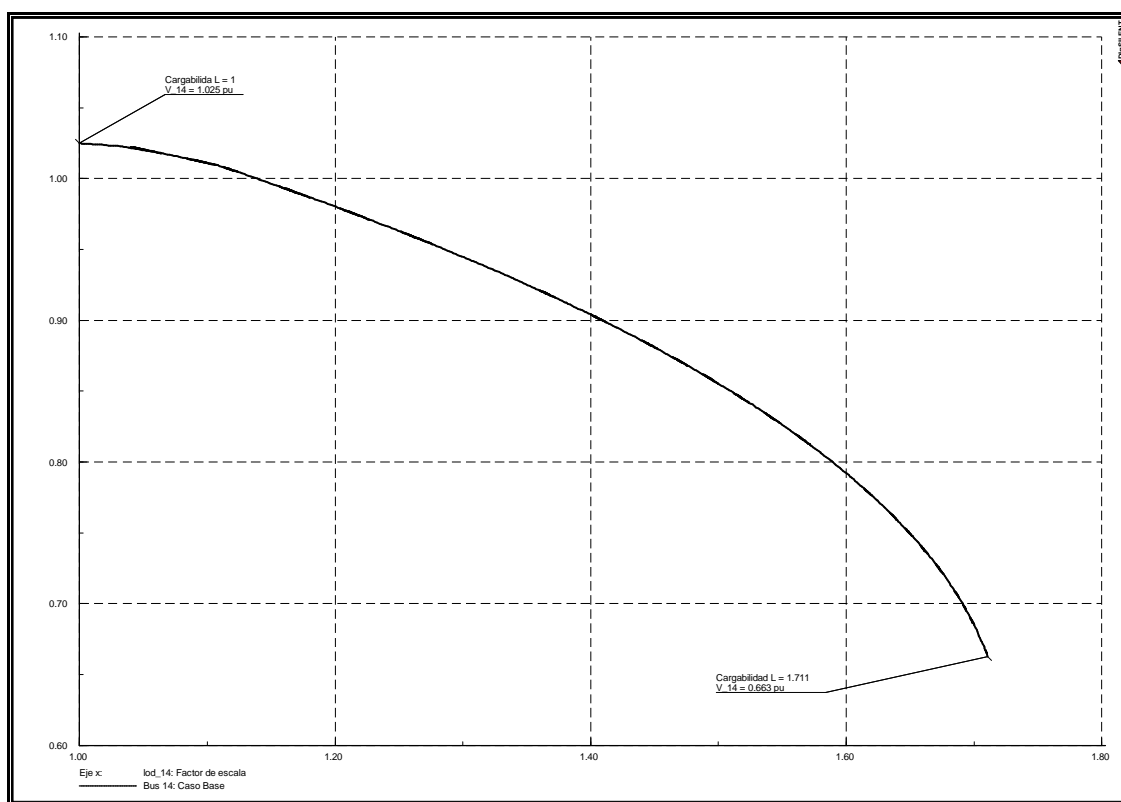


Figura 2. 49 Curva PV para el caso base

### 2.3.2.2 Definición de contingencias.

Partiendo del caso base, y considerando las contingencias descritas en [16] y [17], se determinan las curvas PV mediante flujos de continuación considerando el escalamiento de todas las cargas del SEP. Las contingencias consideradas se plantean analizando el voltaje en la barra 14 del sistema IEEE, la cual corresponde a la barra más débil del sistema [16]. Con relación a las contingencias se consideran la peor contingencia (salida de línea 2-3) y una contingencia media (salida de línea 2-4), definida sobre la base de la disminución de la máxima cargabilidad desde el caso base.

En la figura 2.50 se indican las curvas PV establecidas para el caso base, salida de la línea 2-4, y salida de la línea 2-3.

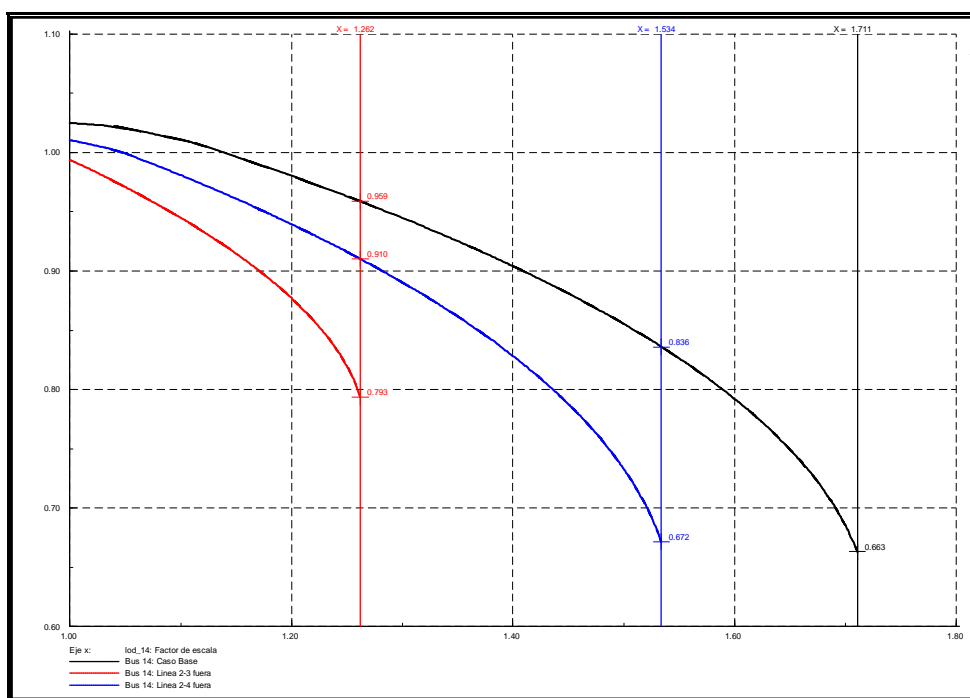


Figura 2. 50 Curvas PV de los casos analizados

En la tabla 2.5 se indican los máximos niveles de cargabilidad para el caso base y para las contingencias consideradas.

Caso analizado	$\lambda_{max}$	$V_{min}$ (pu)
Caso Base	1.71	0.663
Línea 2-4 fuera	1.53	0.672
Línea 2-3 fuera	1.26	0.793

Tabla 2. 5 Máximos niveles de cargabilidad

Como se indicó en 1.4.1.2, el valor de cargabilidad máxima determinado mediante flujos de continuación, resulta ser diferente que el definido mediante simulación dinámica, debido principalmente al modelamiento de los reguladores de voltaje de los generadores, los cuales recuperan los niveles de voltaje del SEP durante el desarrollo de la contingencia permitiendo ampliar la máxima cargabilidad del SEP.

En la figura 2.51 se indican las curvas PV dinámicas establecidas para el caso base, salida de la línea 2-3, y salida de la línea 2-4. Se observa que los niveles de cargabilidad difieren, sin embargo, dentro del proceso de simulación dinámica y dependiendo del adecuado modelamiento de los AVR's, pueden llegar a superarse los límites de capacidad de las máquinas y/o de los elementos del SEP por lo que los niveles de máxima cargabilidad deben determinarse considerando este aspecto. Además se observa que, debido a la presencia de los dispositivos dinámicos, se presentan oscilaciones que, conforme se incrementa la carga, son cada vez menos amortiguadas, disminuyendo también el límite de cargabilidad.

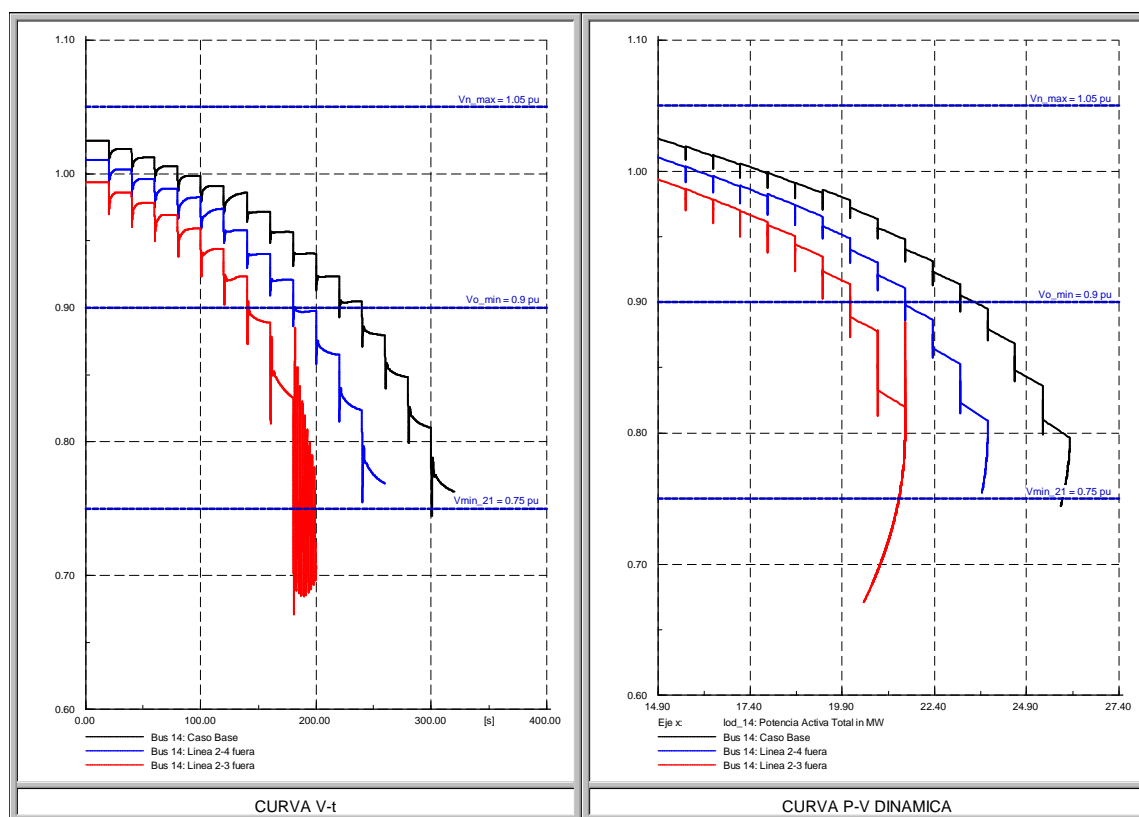


Figura 2. 51 Curvas PV dinámicas

Considerando como límite, el menor valor entre la última oscilación amortiguada y el voltaje mínimo por actuación de protecciones, es posible definir los máximos niveles de cargabilidad para el caso base y para las contingencias consideradas, los mismos que se indican en la tabla 2.6.

<b>Caso analizado</b>	$\lambda_{\max}$	<b>V<sub>min</sub> (pu)</b>
Caso Base	1.74	0.763
Línea 2-4 fuera	1.60	0.769
Línea 2-3 fuera	1.45	0.820

**Tabla 2. 6 Máximos niveles de cargabilidad**

### 2.3.2.3 Criterios de arranque del EACIV.

De la figura 2.51 es posible definir los criterios básicos de arranque del EACIV considerando condiciones normales de operación, por ejemplo, banda de voltaje de operación normal y ante contingencias de:  $0.90V_n < V_n < 1.05V_n$  y un voltaje mínimo de actuación de relés de 0.75 pu.

Considerando los límites dinámicos de la tabla 2.6, se observa que para los tres casos el sistema alcanza su límite por bajo 0.83 pu, por lo que se define el arranque del EACIV con un nivel de voltaje algo superior, por ejemplo  $V_{s\_min} = 0.89$  pu, que en función de cada caso analizado corresponde a los valores de cargabilidad indicados en la tabla 2.7.

<b>Caso analizado</b>	$\lambda_{\max}$	<b>V<sub>s</sub> = 0.89 (pu)</b>	
		$\lambda_s$	% $\lambda_{\max}$
Caso Base	1.74	1.60	91.8
Línea 2-4 fuera	1.60	1.48	93.1
Línea 2-3 fuera	1.45	1.35	93.1

**Tabla 2. 7 Valores de cargabilidad a voltaje 0.89 pu**

Consecuentemente es posible plantear el criterio de arranque del EACIV considerando que el máximo IEVZ se produzca alrededor de un porcentaje de  $\lambda_{\max}$ , tomando en cuenta siempre la banda de voltaje establecida. Se podría considerar operar al SEP hasta el máximo porcentaje de cargabilidad definido en

la tabla 2.7, es decir trabajar con una cargabilidad de ajuste del 96.4%, definido para el caso “Línea 2-3 fuera”. Sin embargo, con este valor de cargabilidad para el “Caso Base”, se llega a operar en valores de voltaje bajos, alrededor de 0.84 pu.

Adicionalmente, al trabajar con este valor de cargabilidad ligeros incrementos de carga podrían conducir al colapso del sistema en cualquier escenario.

Por lo tanto, resulta conveniente que el arranque del EACIV se genere en un valor de cargabilidad de ajuste menor, por ejemplo entre el 85% o 90% de  $\lambda_{max}$ . Debido a la no continuidad de la curva PV dinámica, se utilizan los valores más próximos a estos porcentajes, que representen un punto de operación en estado estable del sistema, para cada caso analizado, los resultados se indican en la tabla 2.8.

Caso analizado	$I_{max}$	$I_{Smin} \approx 85\% I_{max}$			$I_S \approx 90\% I_{max}$			$I_{Smax} \approx 95\% I_{max}$		
		$I_S$	% $I_{max}$	$V_S$ (pu)	$I_S$	% $I_{max}$	$V_S$ (pu)	$I_S$	% $I_{max}$	$V_S$ (pu)
Caso Base	1.74	1.50	86.21	0.931	1.55	89.01	0.905	1.60	91.95	0.879
Línea 2-4 fuera	1.60	1.40	87.50	0.920	1.45	90.63	0.897	1.50	93.75	0.865
Línea 2-3 fuera	1.45	1.30	89.66	0.924	1.35	93.10	0.888	1.40	96.55	0.833

**Tabla 2. 8 Valores de cargabilidad y voltaje para cargabilidades del 85, 90 y 95% de  $I_{max}$**

Se observa que un ajuste del arranque del EACIV en  $I_S = 0.90 \lambda_{max}$  y  $V_{S\_min} = 0.90$  pu permitiría abarcar todos los casos de una manera adecuada, especialmente si se considera que la detección del máximo IEVZ se producirá en el ciclo de medición siguiente a la presencia del máximo, por cuanto el relé detecta la pendiente negativa de la trayectoria del IEVZ para detectar la presencia de un máximo, estos ajustes serán validados en el punto 2.3.5.

#### 2.3.2.4 Determinación de Escenarios Operativos y Contingencias Críticas.

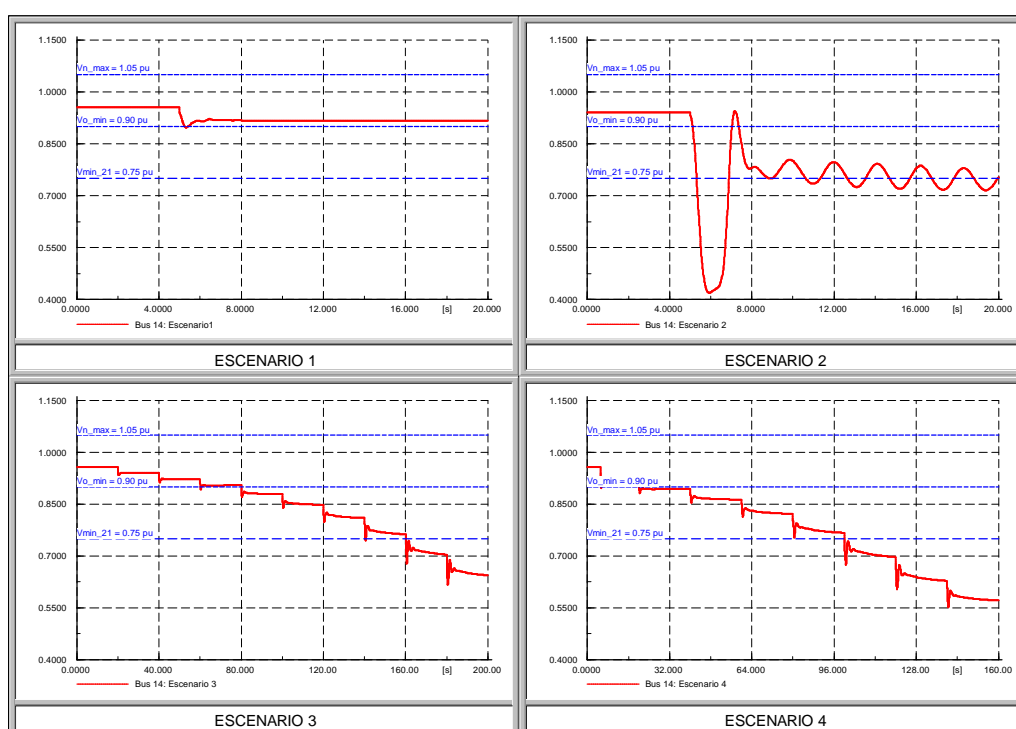
Para el presente estudio, se consideran los siguientes escenarios planteados, partiendo de un punto estable de operación del SEP sumado a diversas contingencias que establecen los tipos de contingencias indicadas en 2.2.3.1.2:

N°	Escenarios planteados	$\lambda_0$
1	Contingencia estable: Caso base + salida de Línea 2-4	1.40
2	Contingencia inestable de corta escala: Caso base + salida de línea 2-3	1.45
3	Contingencia inestable de larga escala 1: Caso Base + incremento progresivo de carga (5%)	1.40
4	Contingencia inestable de larga escala 2: Caso Base + salida de línea 2-4 + incremento progresivo de carga (5%)	1.40

**Tabla 2. 9 Contingencias consideradas**

### 2.3.2.5 Esquema de desconexión de carga.

Para la definición del esquema de desconexión de carga se desarrollan simulaciones dinámicas de cada uno de los escenarios planteados en la tabla 2.9. En la figura 2.52 se indican los resultados de la simulación dinámica de los escenarios planteados. Las dos primeras contingencias, al ser de corta escala, se desarrollan durante un tiempo de simulación de decenas de segundos, mientras que las contingencias 3 y 4, se desarrollan en el orden de decenas de minutos.



**Figura 2. 52 Simulación de escenarios planteados**

**Escenario 1.-** Para este tipo de escenarios el EACIV no debe actuar, por lo que el ajuste del voltaje  $V_{s\_min} = 0.90$  pu, planteado preliminarmente podría resultar inadecuado ya que el voltaje llega a este valor de manera temporal, sin embargo una temporización de 2 segundos al arranque del EACIV corrige este inconveniente.

**Escenario 2.-** Para este tipo de escenarios el EACIV puede actuar si efectivamente el sistema está llegando a un colapso definitivo; el ajuste de temporización planteado en 2 segundos, podría bloquear la actuación del EACIV en un primer ciclo después de la contingencia. Sin embargo, si se cumplieran las condiciones: voltaje menor a  $V_{s\_min}$  y decaimiento del índice IEVZ, el EACIV actuaría tratando en lo posible de mantener la estabilidad del sistema. Se debe mencionar que este escenario es, desde el punto de vista del planeamiento operativo, inseguro en su totalidad, por lo que el sistema no debería ser sometido a una condición como ésta.

**Escenario 3.-** Para este tipo de escenarios el EACIV debe actuar, evitando llegar a condiciones inestables o condiciones oscilatorias, como se observa de la simulación. El ajuste de voltaje resulta adecuado, y el porcentaje de desconexión de carga se plantea en un 5% de la carga nominal inicial. En caso de que el incremento de carga sea superior, se plantean una segunda etapa de ajuste en un voltaje de 0.87 con un porcentaje de desconexión de carga del 10%.

**Escenario 4.-** Este escenario es similar al anterior y los ajustes planteados resultan también adecuados para evitar inestabilidades y condiciones oscilatorias. En resumen se plantean dos etapas de operación del EACIV, definidas en la tabla 2.10.

$I_s = \% I_{max}$	$t_{retardo \text{ y } bloqueo} (s)$	Paso	$V_s (pu)$	Carga desconectada (%)
90	2	1	0.90	5
		2	0.88	10

Tabla 2. 10 EACIV planteado para el sistema IEEE 14 barras

Para efectuar la desconexión de carga prevista en la tabla 2.10, se reconfigura el sistema tal como se observa en el Anexo B.



### 2.3.3 PARAMETRIZACIÓN DEL EACIV

#### 2.3.3.1 Ajustes Módulo: MONITOREO IEVZ.

Considerando los niveles de voltaje establecidos para los pasos de desconexión de carga en 2.3.2, se procede con la parametrización del módulo de monitoreo del IEVZ, se recuerda que para la determinación del exponente de impedancia “ $n$ ” se requiere definir una banda de cargabilidad la misma que se establece entre -2 y +4%, se consideran estos valores a fin de observar las variables necesarias en dos intervalos estables dentro de la simulación dinámica, alrededor del valor de ajuste planteado  $\lambda_s = 90 \lambda_{max}$ .

Aplicando la metodología para el ajuste del módulo “MONITOREO IEVZ” indicado en 2.2.3.2.1, se determina el exponente de carga “ $n$ ”, los resultados se detallan en la figura 2.53 y se indican en la tabla 2.11.

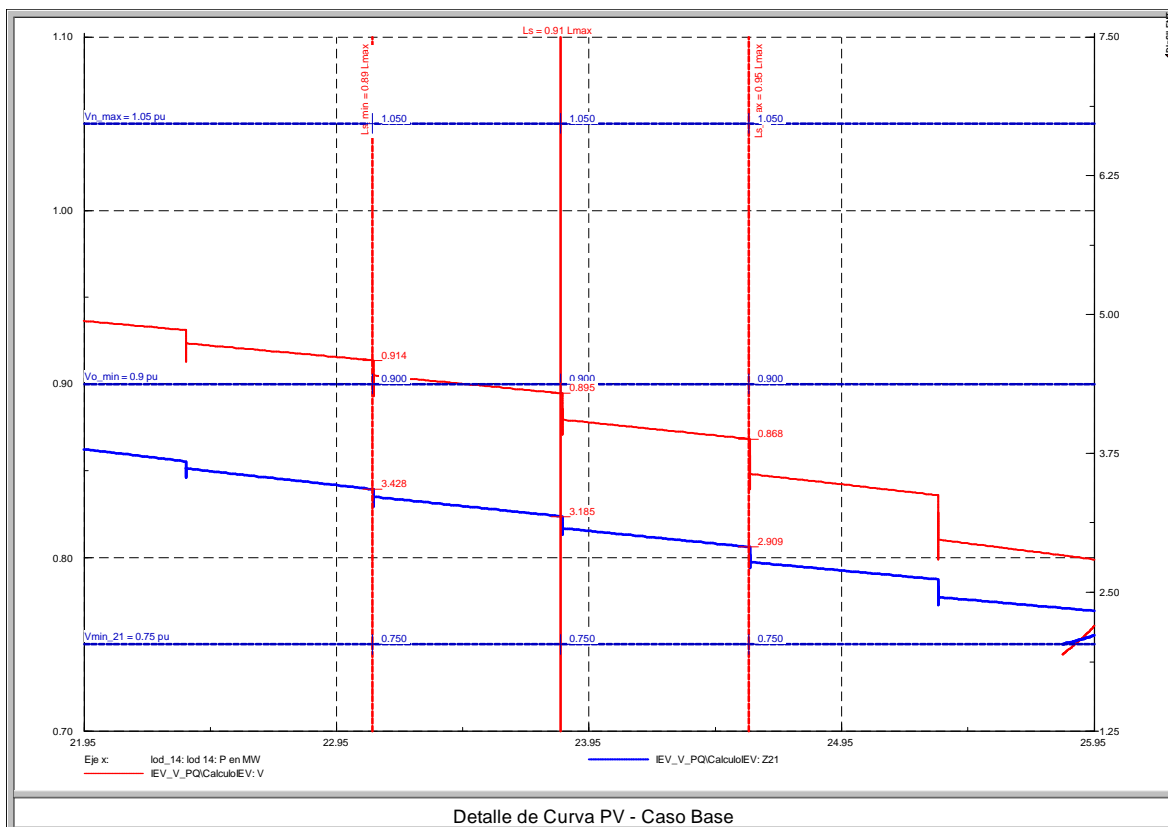


Figura 2. 53 Detalle de Banda de Cargabilidad

Banda de Cargabilidad  $\Delta\lambda = -2$  y  $+4\%$

Paso	Casos	$I_{Smin} = 0.89 I_{max}$		$I_{Smax} = 0.95 I_{max}$		$n = 8 \cdot \left[ \frac{\ln V_{max}  - \ln V_{min} }{\ln Z_{max}  - \ln Z_{min} } \right]$
		$V_{max}$	$Z_{max}$	$V_{min}$	$Z_{min}$	
1	Caso Base: $\lambda_{max} = 1.74$	0.914	3.428	0.868	2.909	2.516

Tabla 2. 11 Cálculo del exponente de impedancia "n"

### 2.3.3.2 Ajustes Módulo: MONITOREO VOLTAJE

Aplicando la metodología para el ajuste del módulo "MONITOREO VOLTAJE" indicado en 2.2.3.2.2, y considerando el ajuste del exponente de carga  $n = 2.516$ , se determinan las curvas P e IEVZ vs V, para los tres casos planteados, los resultados se indican en las figuras 2.54, 2.55 y 2.56.

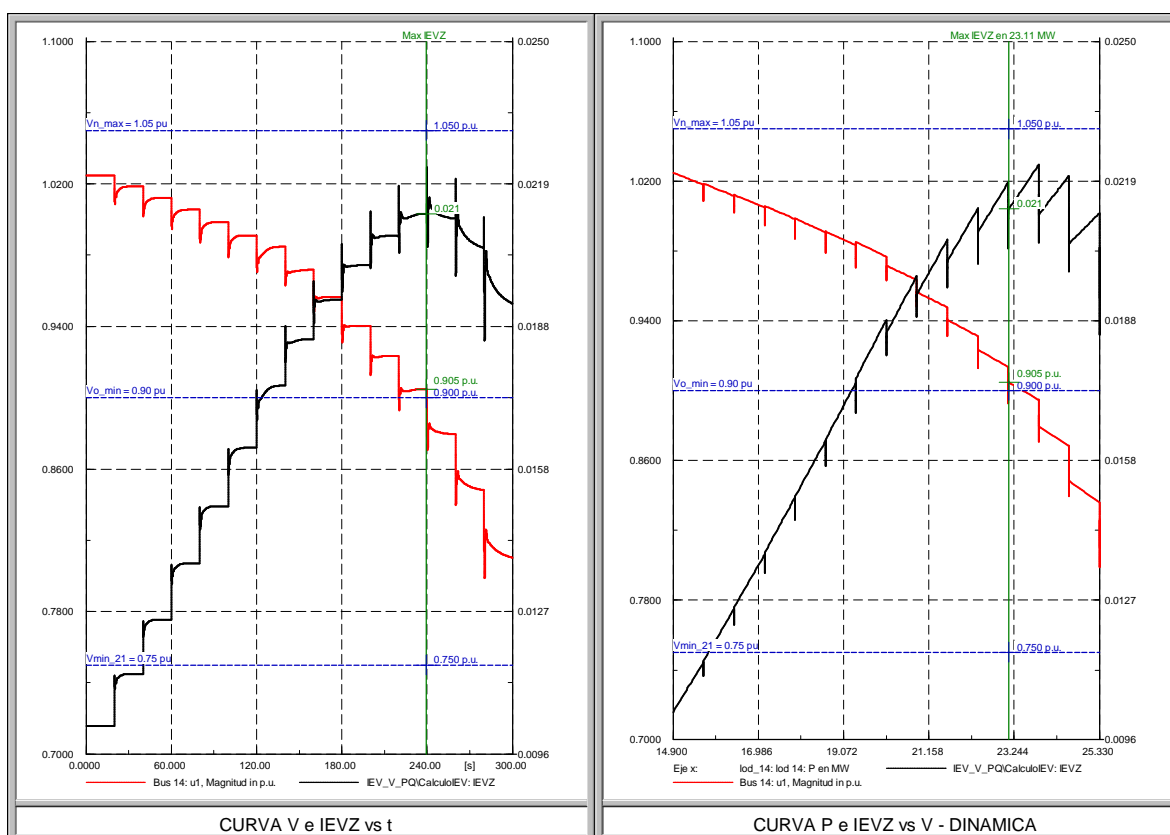


Figura 2. 54 Curva P e IEVZ vs V – Caso Base

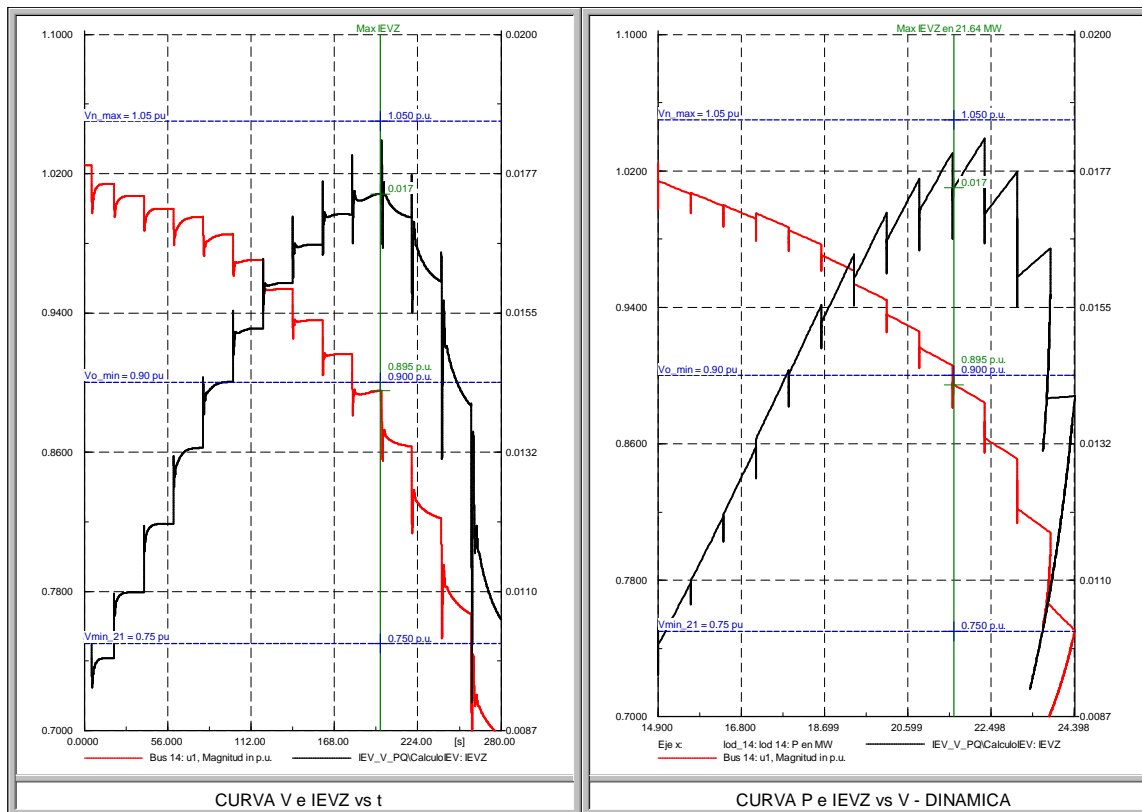


Figura 2. 55 Curva P e IEVZ vs V – Caso Salida de Línea 2-4

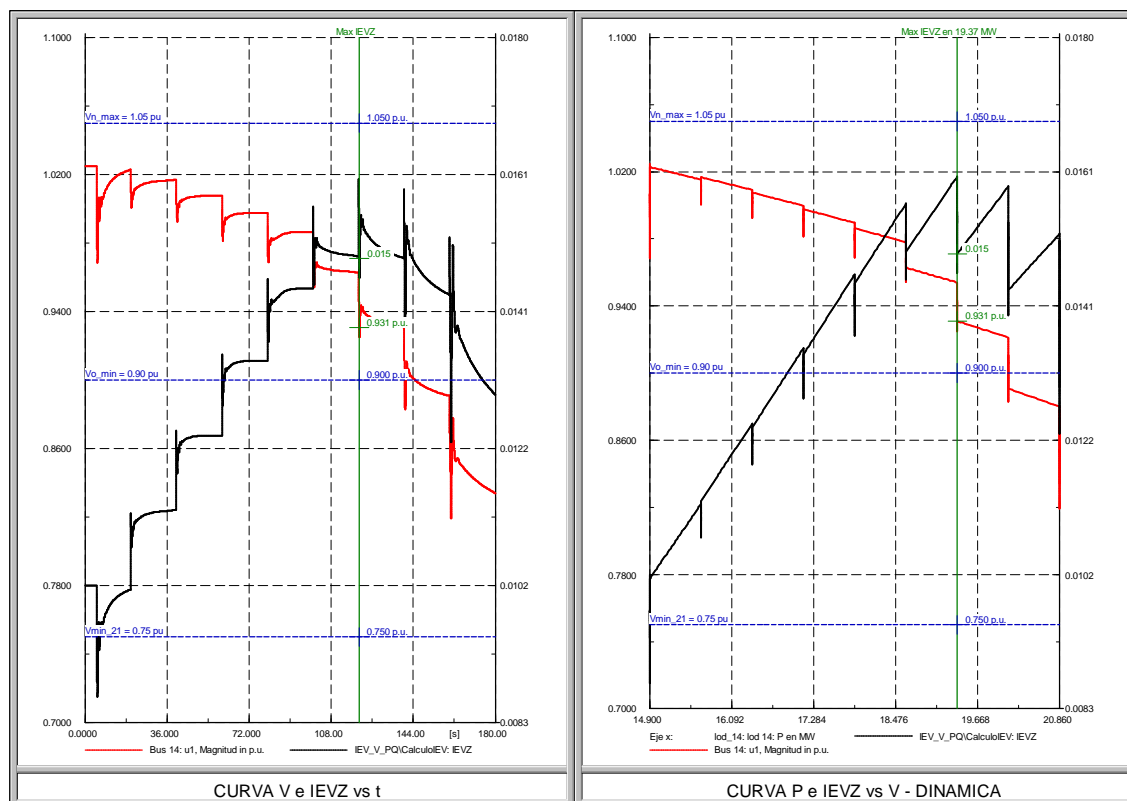


Figura 2. 56 Curva P e IEVZ vs V – Caso Salida de Línea 2-3

De esta figura se observa que los máximos del IEVZ se presentan en los siguientes valores:

Caso analizado	$I_{max}$	Valores en el punto de máximo IEVZ			
		$IEVZ_{max}$	$I_{IEVZ-max}$	$\% I_{max}$	$V_{IEVZ-max}$ (pu)
Caso Base	1.74	0.021	1.55	89.13	0.905
Línea 2-4 fuera	1.60	0.017	1.45	90.77	0.895
Línea 2-3 fuera	1.45	0.015	1.30	89.66	0.931

**Tabla 2. 12 Parámetros en el punto de máximo IEVZ**

Se observa que para los tres casos el EACIV efectivamente arrancará cuando se cumplan las dos condiciones del esquema inicialmente planteado, por lo que los ajustes propuestos resultan adecuados para este sistema.

A continuación se indican las simulaciones realizadas considerando el monitoreo del IEVZ y de una señal denominada “Disparo” la cual se genera una vez que se produzca un máximo IEVZ. Esta señal es producida mediante programación en DigSilent Programming Language – DPL [18], mediante un código que procesa la señal IEVZ generada por el dispositivo “RELE IEV” indicado en 2.1.2.1. El código de programación se indica en el Anexo C.

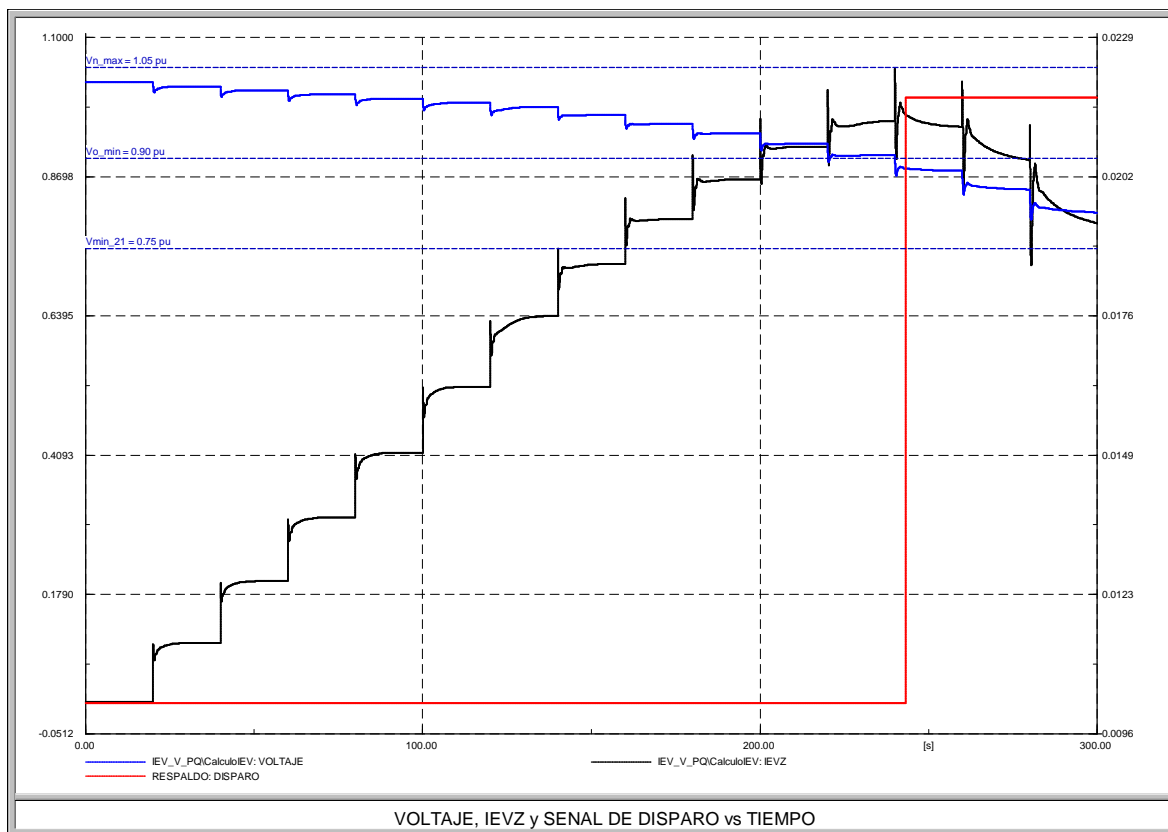


Figura 2. 57 Generación de señal de disparo - Caso Base

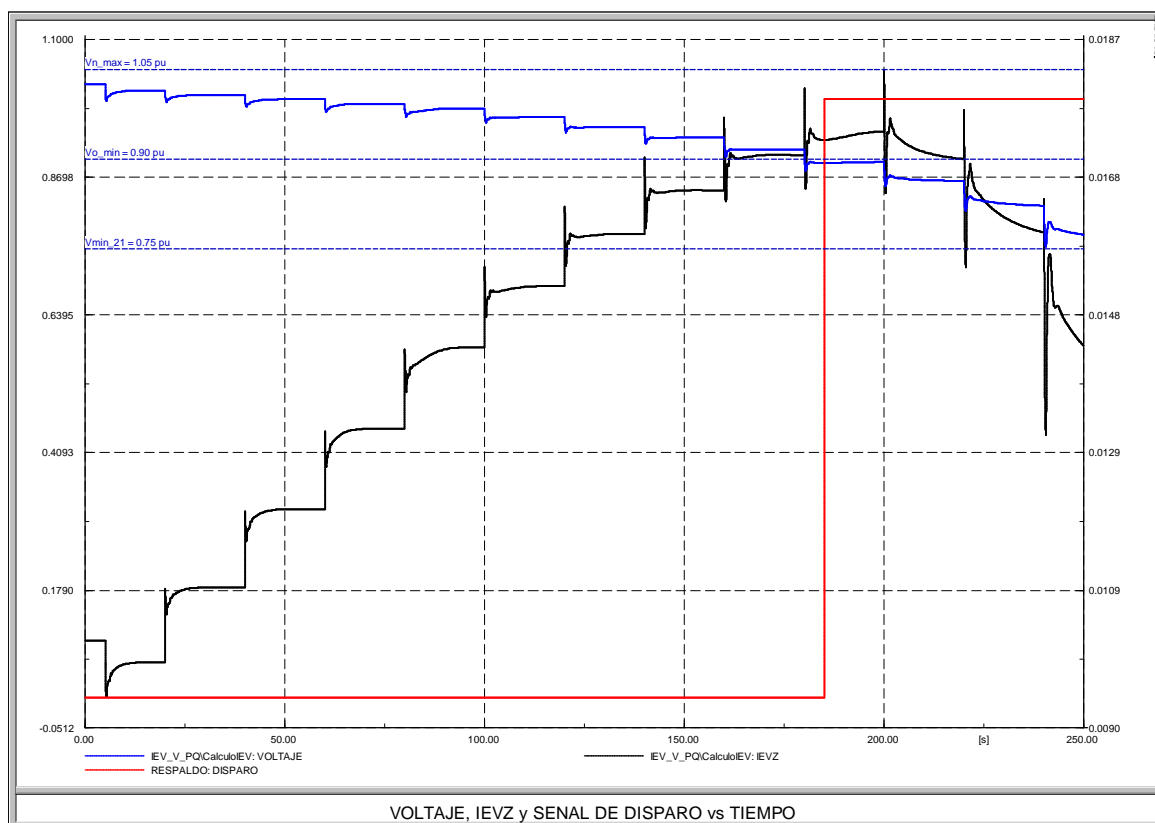
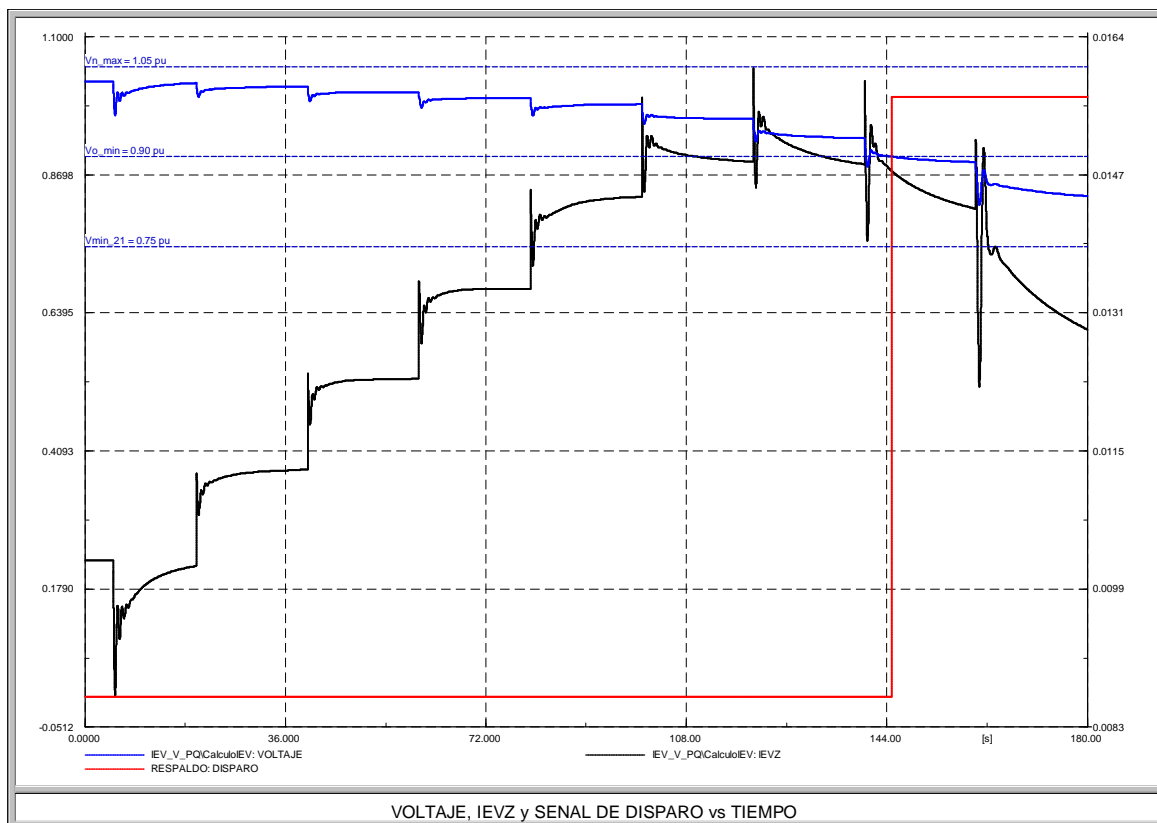


Figura 2. 58 Generación de señal de disparo - Caso Salida de Línea 2 - 4



**Figura 2. 59 Generación de señal de disparo - Caso Salida de Línea 2 - 3**

Se observa que la señal de disparo para los tres casos se genera efectivamente posterior al máximo del IEVZ y con un voltaje inferior al de ajuste.

### 2.3.3.3 Ajustes Módulo: BLOQUEO CORTOCIRCUITOS

Aplicando la metodología para el ajuste del módulo “BLOQUEO CORTOCIRCUITOS” indicado en 2.2.3.2.3, se determinan los respectivos cortocircuitos: trifásicos, bifásicos y monofásicos, los resultados se indican en la tabla 2.13.

Cortocircuito	Resistencia de falla (W)	Voltaje (pu)		
		V1	V2	V0
Trifásico	10	<b>0.704</b>	0	0
Bifásico	30	0.946	<b>0.205</b>	0
Monofásico	30	1.057	<b>0.079</b>	0.059

**Tabla 2. 13 Resultados de Cortocircuitos**

Con estos valores se establecen los siguientes valores de ajuste:  $V1_{max} = 0.75$  pu y  $V2_{min} = 0.05$  pu.

### 2.3.4 VALIDACIÓN DEL EACIV

A continuación se desarrollan simulaciones dinámicas, las mismas que consideran la actuación del relé que desarrolla el EACIV. Estas simulaciones contemplan los tres casos indicados en la tabla 2.5 en 2.3.2.2.

Para estos casos se simula incrementos progresivos de carga hasta producir la operación de la primera etapa del EACIV con una desconexión de carga del orden del 5%. En los casos “Línea 2-4 fuera” y “Línea 2-3 fuera” se simulan las aperturas de estas líneas al tiempo  $t = 5$  segundos.

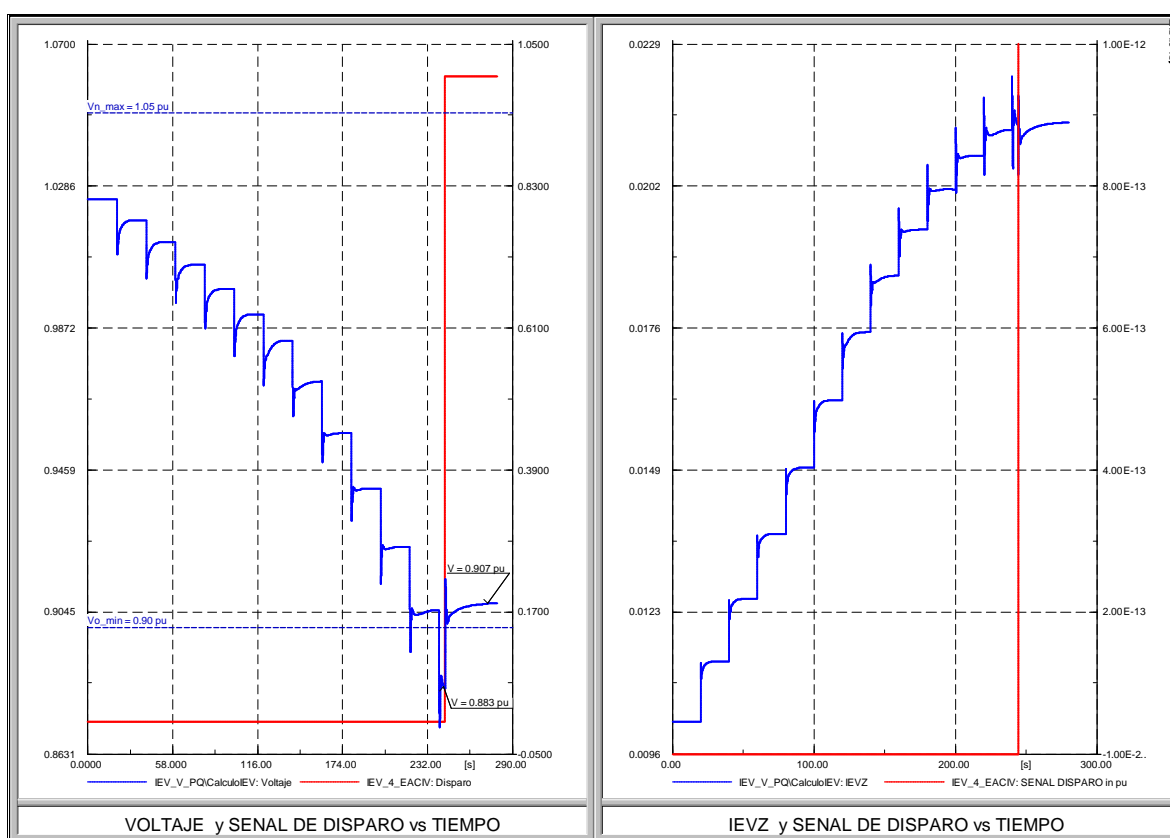


Figura 2. 60 Actuación del primer paso del EACIV - Caso Base

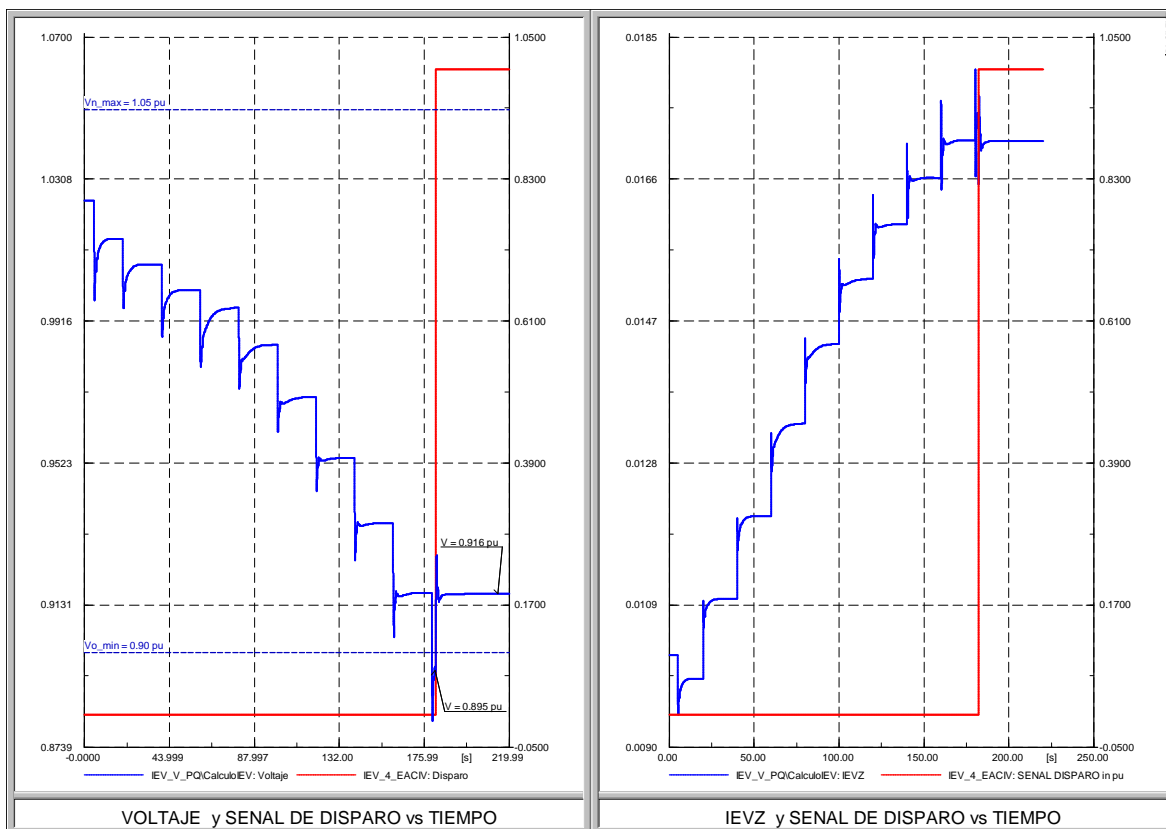


Figura 2. 61 Actuación del primer paso del EACIV - Caso Salida de Línea 2 - 4

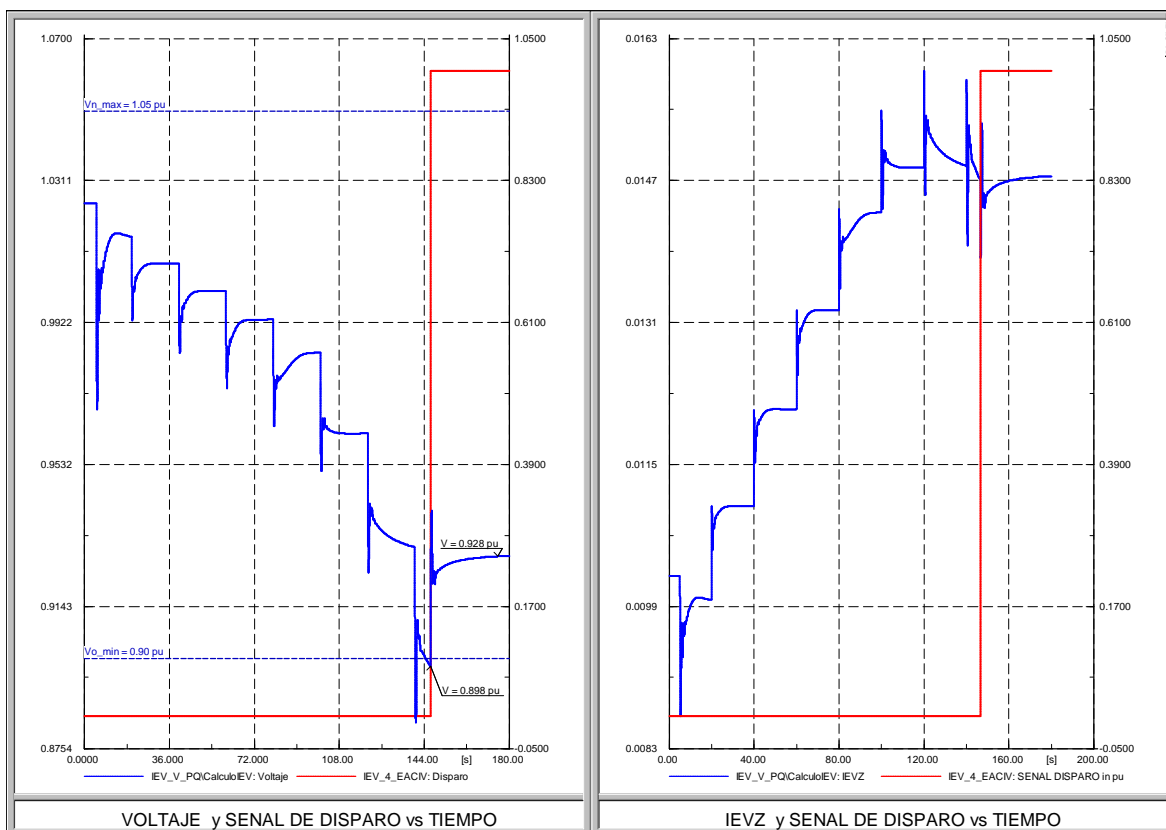


Figura 2. 62 Actuación del primer paso del EACIV - Caso Salida de Línea 2 - 3

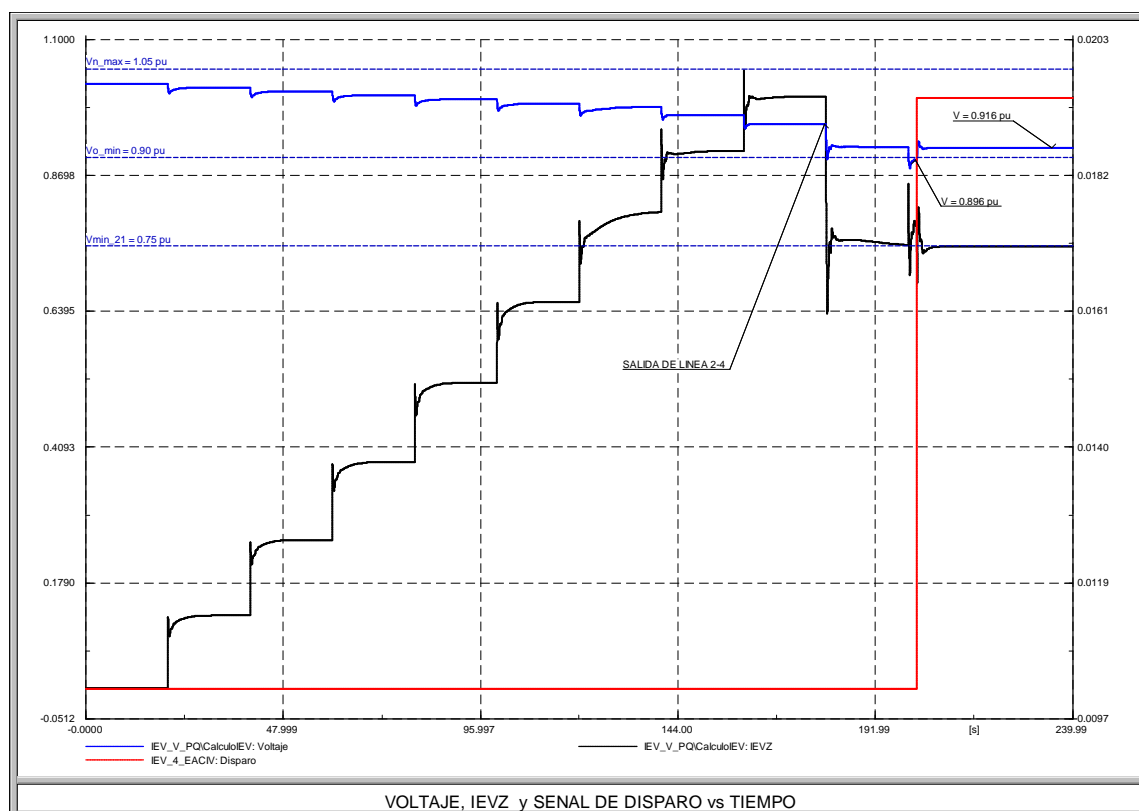


Se observa que la respuesta del sistema es adecuada con el porcentaje de desconexión de carga previsto. Adicionalmente se desarrollan simulaciones considerando los escenarios previstos en 2.3.2.4 e indicados en la tabla 2.14, se debe señalar que, de los cuatro escenarios, únicamente se indican las simulaciones de los escenarios 1 y 2 por cuanto los escenarios 3 y 4 se encuentran incluidos dentro de los casos 1 y 2 expuestos en las figuras 2.60 y 2.61.

N°	Escenarios planteados	$\lambda_0$
1	Contingencia estable: Caso base + salida de Línea 2-4	1.40
2	Contingencia inestable de corta escala: Caso base + salida de línea 2-3	1.45

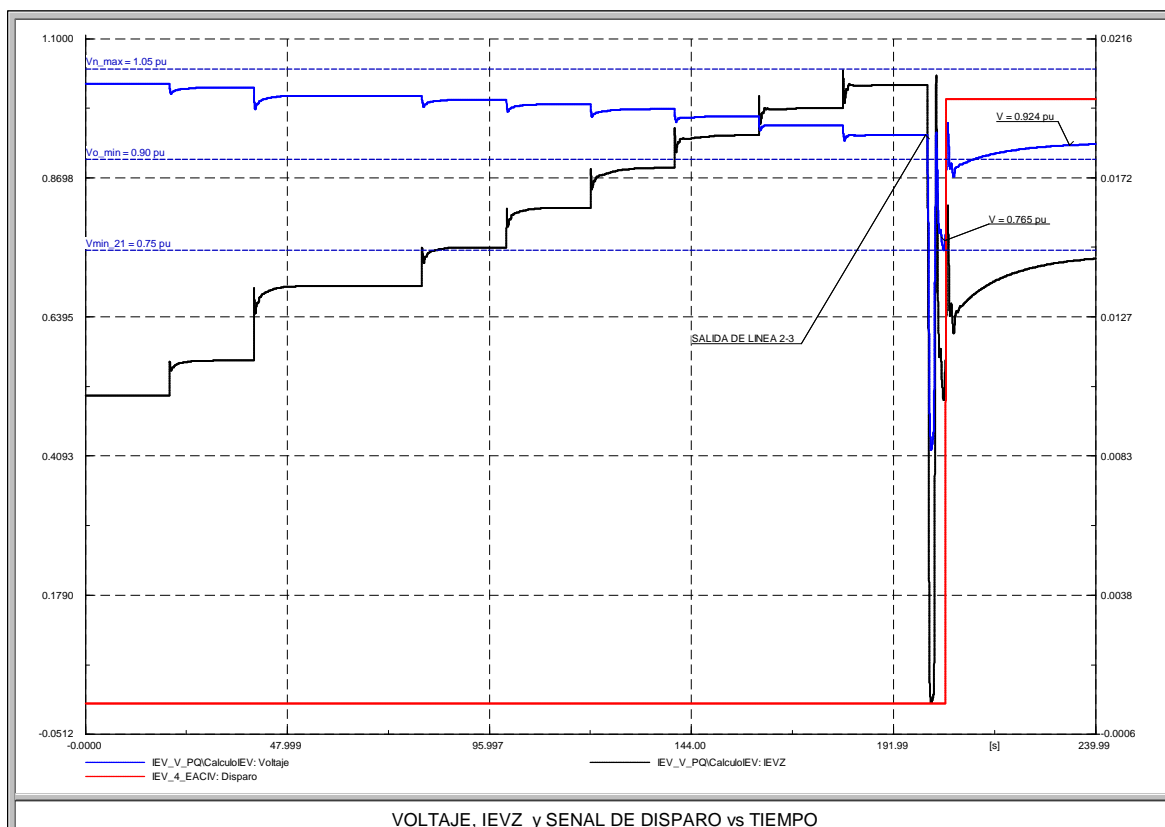
**Tabla 2. 14 Contingencias consideradas**

Las simulaciones se indican a continuación:



**Figura 2. 63 Contingencia estable: Salida de Línea 2 – 4, posterior actuación del primer paso del EACIV**

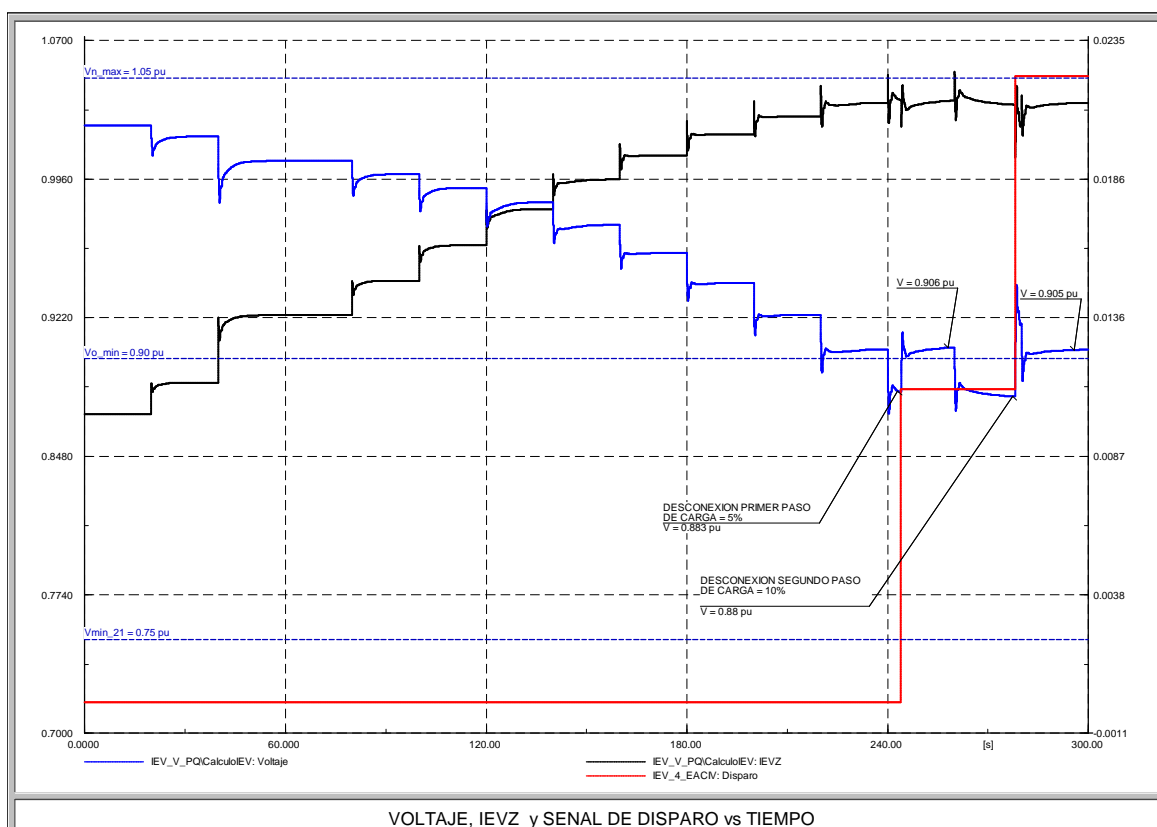
Se observa que ante una contingencia estable, figura 2.63, el EACIV no opera por cuanto el sistema encuentra un nuevo punto de operación estable el cual se encuentra dentro de la banda de voltaje de operación normal. Como se presenta en esta simulación el EACIV operará cuando efectivamente se presente un máximo del IEVZ y un nivel de voltaje menor a 0.90 pu.



**Figura 2. 64 Contingencia inestable: Salida de Línea 2 – 3**

Se observa que ante una contingencia inestable, figura 2.64, el EACIV opera por cuanto se han cumplido las condiciones necesarias: máximo IEVZ y voltaje menor a 0.90 pu. Esta operación del EACIV resulta adecuada ya que el sistema encuentra un nuevo punto de operación estable, que en caso de no desconectar carga alguna se producirían oscilaciones no amortiguadas que llevarían a un colapso del sistema. Es decir, si bien el EACIV por definición no contempla mitigar este tipo de contingencias, en este caso particular resulta adecuado y beneficioso para el sistema.

Adicionalmente se realizan simulaciones con la finalidad de verificar el siguiente paso del EACIV, que corresponden a un disparo del 10% de la carga. Para esto se ha desarrollado incrementos progresivos del 5% de las cargas del sistema, hasta producir la operación de cada uno de los pasos de desconexión de carga previstos. Los resultados se indican en las figura 2.65.



**Figura 2. 65 Actuación del primer y segundo paso del EACIV**

Se observa que el primer paso de desconexión de carga permite recuperar el nivel de voltaje desde 0.883 pu a 0.906 pu y el segundo paso de desconexión permite recuperar el voltaje desde 0.880 pu hasta 0.905 pu.

Si bien una vez operado el primer paso, ante el siguiente incremento de carga se vuelve a producir condiciones para la desconexión de un 5% de carga, es decir,  $V < 0.90$  pu e IEVZ con pendiente negativa; sin embargo, esta no opera y se espera a que se presenten condiciones para el segundo paso de desconexión de carga del 10% que es el que efectivamente se produce. Esta situación puede no ser la más adecuada, pero si es una situación probable por cuanto la cantidad de

carga a desconectarse dependerá de las condiciones de distribución de carga de las salidas de las subestaciones. En consecuencia la definición de los porcentajes de carga que pueden desconectarse debe realizarse considerando los estudios eléctricos respectivos y las condiciones reales de cada subestación donde se implemente el esquema de desconexión de carga.