

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**CONTROL JERÁRQUICO DE VOLTAJE UTILIZANDO
METODOLOGÍAS HÍBRIDAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA**

**UBICACIÓN DE NODOS PILOTOS PARA CONTROL SECUNDARIO
DE VOLTAJE, UTILIZANDO LAS METODOLOGÍAS: MATRIZ
JACOBIANA Y FLUJO EXTENDIDO DE POTENCIA; Y, EN BASE A
ESTAS METODOLOGÍAS PROPONER UNA METODOLOGÍA
HÍBRIDA.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRICIDAD**

JOSÉ ANDRÉS SÁNCHEZ ROBAYO

jose.sanchez@epn.edu.ec

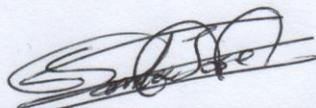
DIRECTOR: PROF. DR. CARLOS FABÍAN GALLARDO QUINGATUÑA (PhD)

carlos.gallardo@epn.edu.ec

DMQ, abril 2023

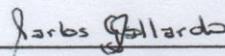
CERTIFICACIONES

Yo, JOSÉ ANDRÉS SÁNCHEZ ROBAYO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



JOSÉ ANDRÉS SÁNCHEZ ROBAYO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JOSÉ ANDRÉS SÁNCHEZ ROBAYO, bajo mi supervisión.



DR. CARLOS FABÍAN GALLARDO QUINGATUÑA
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el los productos resultantes del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

JOSÉ ANDRÉS SÁNCHEZ ROBAYO

CARLOS FABÍAN GALLARDO QUINGATUÑA

DEDICATORIA

A mis padres, Patricio y Fanny que han sido un pilar fundamental en toda mi formación estudiantil con sus consejos y apoyo, alentándome a seguir adelante sin importar las circunstancias que se presenten en el camino.

A Mi hermano Ismael, por todo el apoyo brindado durante mi carrera universitaria.

A todos mis familiares que siempre creyeron en mí.

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la virgen santísima de agua santa de Baños por guiarme en este camino.

A mi director; Ing. Carlos Gallardo, PhD, quien con sus conocimientos y consejos ayudo a que se desarrolló este trabajo.

A mi madre Fanny, mi padre Patricio y mi hermano Ismael, que siempre me motivaron a seguir adelante.

A mis grandes amigos Javier y Andrés que estuvieron desde el comienzo de este largo camino, apoyándome con sus consejos y su gran amistad.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 estabilidad de voltaje	3
1.4.2 control jerarquico de voltaje	4
1.4.3 Matriz jacobiana.....	6
1.4.4 flujo extendido de potencia	9
1.4.5 división en áreas dinámicas.....	10
1.4.6 nodos pilotos.....	10
2. METODOLOGÍA.....	12
2.1 Matriz jacobina reducida	12
2.1.1 obtencion de la matriz jacobina y autovalores	15
2.1.2 energia de la matriz y determinacion de areas.....	16
2.1.3 calculo de los autovalores IZQUIERDOS Y derechos	17
2.1.4 Calculo de la matriz reducida, eleccion de nodos pilotos y barras para cada area.	18
2.2 flujo extendido de potencia.....	21
3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	23
3.1 Resultados.	23
3.1.1 Matriz Jacobiana Reducida.....	23
3.1.2 Flujo extendido de potencia.....	37
3.1.3 Modelo hibrido.....	44
3.2 Conclusiones.....	51
3.3 Recomendaciones.....	52

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
5. ANEXOS.....	54

RESUMEN

En el presente trabajo de integración curricular, a través de los programas PowerFactory y Phytón, se realiza la división de áreas dinámicas y elección de nodos piloto para el control secundario de voltaje en el sistema de 39 barras de la IEEE, mediante dos diferentes metodologías. La primera consiste en emplear la matriz Jacobiana reducida, la cual permite encontrar las áreas dinámicas y nodos piloto y, por otro lado, la metodología del flujo extendido de potencia que proporciona únicamente los nodos piloto, los cuales serán ubicados en el sistema de 39 barras propio del programa PowerFactory, con lo cual se analiza los niveles de voltaje que se encuentran dentro de la banda de operación, que va de 0.95 p.u a 1.05 p.u antes y después de la incorporación de las áreas dinámicas y los nodos piloto.

Este trabajo se efectúa en tres puntos de operación: demanda base, demanda mínima y demanda máxima. Esto permitirá analizar los resultados obtenidos y buscar un modelo híbrido que una las dos metodologías desarrolladas.

PALABRAS CLAVE: nodo piloto, área dinámica, flujo extendido, jacobiana reducida.

ABSTRACT

In this curricular integration work, through the PowerFactory and Phyton programs, the division of dynamic areas and choice of pilot nodes for the secondary voltage control in the IEEE 39-bus system is performed using two different methodologies. The first one consists of using the reduced Jacobian matrix, which allows finding the dynamic areas and pilot nodes and, on the other hand, the methodology of the extended power flow that provides only the pilot nodes, which will be located in the 39-bus system of the PowerFactory program, which analyzes the voltage levels that are within the operating band, ranging from 0.95 p.u to 1.05 p.u before and after the incorporation of the dynamic areas and pilot nodes.

This work is carried out at three operating points: base demand, minimum demand, and maximum demand. This will allow analyzing the results obtained and searching for a hybrid model that joins the two methodologies developed.

KEYWORDS: pilot node, dynamic area, extended flow, reduced Jacobi

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos al ser dinámicos están expuestos a cambios constantes causados por maniobras operativas o perturbaciones como la salida o entrada intempestiva de carga o fallas en las barras o las líneas de transmisión, lo cual puede ocasionar inestabilidad de diferentes tipos tales como inestabilidad de voltaje, inestabilidad de frecuencia e inestabilidad de ángulo pudiendo llegar al colapso del sistema.

El estudio de estabilidad de voltaje tiene como objetivo principal el de mantener niveles que estén dentro de las bandas de operación (de 0.95 p.u a 1.05 p.u) mediante la utilización de recursos de potencia reactiva del sistema de generación o a su vez utilizando compensadores sincrónicos, controladores estáticos (SVC's) y controladores de tensión y potencia reactiva (VQC's). Es importante señalar que esto se ha venido desarrollando en el transcurso del tiempo de una forma manual, es decir, lo realiza el operador del sistema.

Este estudio se realiza a corto, mediano y largo plazo, buscando que el sistema se encuentre en equilibrio y no llegue al colapso, para ello se dispone de diferentes metodologías; una de ellas es el control jerárquico de voltaje, el cual consta del nivel de control primario, control secundario y control terciario. Para realizar este control en el sistema de potencia, primero este debe ser dividido en áreas dinámicas y, además, es necesario seleccionar una barra piloto.

Se han propuesto dos enfoques, determinísticos y heurísticos que permitan dividir en áreas dinámicas a los sistemas eléctricos, con lo cual se podrá efectuar un control de voltaje simplificado, de tal manera que el control que se realice sobre estas áreas sea independiente, es decir, que no tenga un impacto significativo sobre las demás y permita encontrar una barra piloto en cada área.

De acuerdo con lo planteado, en este trabajo se realiza la división de áreas dinámicas del sistema de 39 barras de la IEEE propio de PowerFactory utilizando dos metodologías heurísticas como son: la matriz Jacobina reducida y el flujo extendido de potencia buscando tener niveles de voltaje que estén dentro de las bandas de operación.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Ubicar las barras pilotos para el control secundario de voltaje en el sistema New England, utilizando la metodología del flujo extendido de potencia y la matriz jacobiana reducida, además obtener las áreas dinámicas del sistema, mediante el uso de los programas PowerFactory y Phytion.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener las barras pilotos por la metodología de flujo extendido de potencia utilizando el programa PowerFactory
- Obtener las barras piloto y áreas dinámicas utilizando la matriz jacobiana reducida.
- Aplicar los algoritmos en el programa Phytion para encontrar la energía de la matriz jacobiana reducida, autovectores izquierdos, autovectores derechos, definir el número de áreas dinámicas y determinar la matriz de participación.
- Proponer una metodología híbrida para la determinación de barras pilotos.
- Analizar mediante simulaciones los niveles de voltaje en el sistema posterior a la ubicación de las barras pilotos por la matriz jacobiana reducida en Phytion con respecto al flujo extendido de potencia ejecutado en PowerFactory

1.3 ALCANCE

El presente Trabajo de Integración Curricular, a través de los programas Phytion y PowerFactory se implementará los algoritmos y simulaciones adecuadas para los métodos de la matriz jacobiana reducida y el flujo extendido de potencia, los cuales permitan encontrar las barras pilotos del sistema que serán ubicados en el sistema New England de 39 barras en PowerFactory y finalmente se realizará las simulaciones necesarias y se observará los niveles de voltaje en barras mediante los métodos mencionados.

Con este estudio se pretende identificar las barras piloto y las áreas dinámicas para los puntos de operación típicos del sistema.

1.4 MARCO TEÓRICO

En el presente ítem se aborda un resumen de los conceptos teóricos necesario para realizar el Trabajo de Integración Curricular, analizando la estabilidad de voltaje, el control jerárquico de voltaje, el flujo extendido de potencia, los nodos pilotos y la división en áreas dinámicas, permitiendo entender toda la base teórica.

1.4.1 ESTABILIDAD DE VOLTAJE

El estudio de la estabilidad de voltaje es importante en los sistemas eléctricos de potencia ya que se debe mantener niveles de voltaje que estén dentro de las bandas de operación, para ello los sistemas deben ser resilientes ante las perturbaciones que se presenten como, por ejemplo, las salidas o entradas intempestivas de carga a las barras del sistema o también por contingencias que se presenten en el mismo[1], [2].

Para poder tener estabilidad de voltaje en todas las barras se debe tener en cuenta que si se incrementa la potencia reactiva en una barra el voltaje debe aumentar, pero si al incrementar la potencia reactiva en una barra, el voltaje de cualquier barra decrementa el sistema estaría en inestabilidad, como se muestra a continuación en la siguiente expresión [3].

$$\uparrow \Delta Q \rightarrow \uparrow \Delta V \text{ (estabilidad)}$$

$$\uparrow \Delta Q \rightarrow \downarrow \Delta V \text{ (inestabilidad)}$$

La inestabilidad de voltaje se puede presentar debido a una ocurrencia de una perturbación en el sistema, en este caso el voltaje empieza a caer o aumentar de tal manera que llega a salirse de los límites permitidos, llevando a la desconexión de carga o a la salida de una o varias líneas de transmisión[4].

Según[5], [6], la estabilidad de voltaje se divide de la siguiente manera:

- Estabilidad de voltaje ante grandes perturbaciones
- Estabilidad de voltaje ante pequeñas perturbaciones
- Estabilidad de voltaje de corta duración
- Estabilidad de voltaje de larga duración

1.4.1.1 Estabilidad de voltaje de grandes perturbaciones

Esta estabilidad corresponde a cuando el sistema es capaz de responder a perturbaciones como, fallas, contingencias en líneas importantes o salida intempestiva de generación, para su estudio es necesario realizar un modelamiento muy detallado mediante ecuaciones no lineales y, además, el análisis se debe realizar en un periodo de tiempo lo suficientemente amplio que permita identificar las acciones tomadas por los dispositivos de protección y control[5].

1.4.1.2 Estabilidad de voltaje de pequeñas perturbaciones

Esta estabilidad corresponde a cuando el sistema es capaz de responder a perturbaciones pequeñas provenientes de las cargas, para realizar su estudio se debe tener en cuenta varias simulaciones, con lo cual se puede evaluar los casos que se presenten debido a contingencias. Un índice que permite establecer la estabilidad en este análisis es la variación que existe entre el voltaje y la potencia reactiva en las barras, es decir, si la variación es positiva en todas las barras es estable, pero si la variación es negativa en una sola barra del sistema se torna inestable [5].

1.4.1.3 estabilidad de corta duración

El periodo de estudio de esta estabilidad de voltaje está en el orden de los milisegundos a los pocos segundos, principalmente está relacionado con el análisis en estado dinámico de los elementos de carga que actúan de forma inmediata.

1.4.1.4 estabilidad de larga duración

Este estudio de estabilidad está en el orden de los pocos minutos, donde se analiza los elementos del sistema que tiene una actuación de forma lenta, como los transformadores que disponen de tap's.

1.4.2 CONTROL JERARQUICO DE VOLTAJE

El control jerárquico de voltaje tiene como objetivo principal, el de mantener los niveles de voltaje dentro de sus bandas de operación mediante la incorporación y coordinación de elementos que proporcionan potencia reactiva al sistema durante fallas o contingencias que se presente.

Esto se realiza mediante el desacoplamiento de las áreas del sistema para poder efectuar el control en cada área de una manera eficiente.

Según [7], el control jerárquico de voltaje tiene tres niveles de control

- Control primario

- Control secundario
- Control terciario

1.4.2.1 Control primario

El control primario de voltaje está ligado directamente con los elementos como, los generadores, compensadores sincrónicos, controladores estáticos (SVC's) y controladores de tensión y potencia reactiva (VQC's), este control es el primero en actuar y su acción se debe realizar de forma inmediata (en el orden de los milisegundos a pocos segundos) buscando aumentar o disminuir la potencia reactiva, con el objetivo de estabilizar el voltaje en las bandas de operación [8].

1.4.2.2 Control secundario

Este control es el encargado de supervisar el nivel de voltaje en los nodos pilotos y además de administrar los recursos de potencia reactiva. Si el umbral de error de voltaje supera $\pm 2\%$ se emitirá una alerta de bajo voltaje (se debe inyectar potencia reactiva), y si existe un sobrevoltaje (se debe desconectar potencia reactiva), el control secundario se lo realiza en el orden de los pocos minutos [8].

Para realizar el control secundario de voltaje se realiza una división del sistema en áreas dinámicas independientes, identificando un nodo piloto el cual permite tener un perfil de voltaje de la zona, convirtiéndose en un control zonal [8].

En la figura 1.1 se muestra un ejemplo de la división de áreas de un sistema para luego poder realizar el control secundario de voltaje

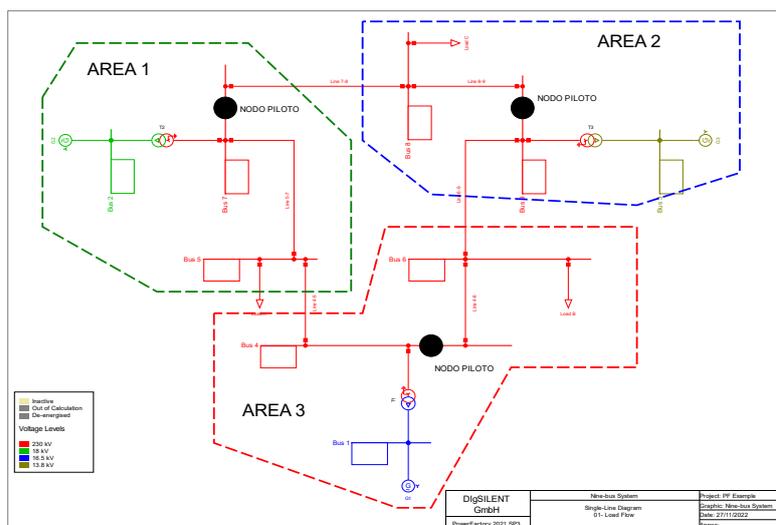


Figura 1.1. División de áreas dinámicas y elección de nodo piloto en el sistema IEEE de 9 barras.

1.4.2.3 Control terciario

Se encarga de realiza el despacho óptimo de la potencia reactiva en los sistemas, su operación se realiza en el orden de los minutos (a largo plazo) y busca que la potencia reactiva que ingresa al sistema vaya de la más económica a las más costosas [8].

En la figura 1.2 Se muestra un esquema del control jerárquico de voltaje.

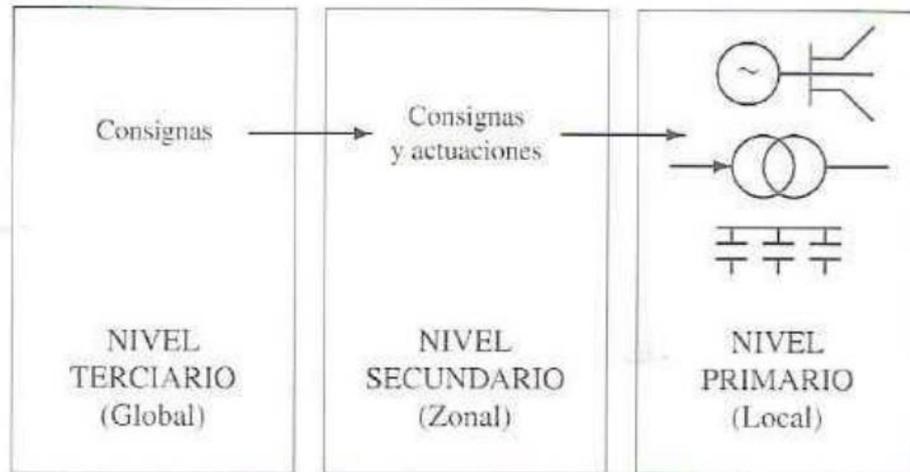


Figura 1.2. Esquemática del control jerárquico de voltaje.

1.4.3 MATRIZ JACOBIANA

Para estimar un sistema eléctrico de potencia es necesario ejecutar el flujo de potencia mediante los diferentes métodos que existen, permitiendo tener en cada barra la potencia activa (P_i), la potencia reactiva (Q_i), el voltaje (V_i) y el ángulo (θ_i). Además, para ejecutar el flujo de potencia se debe tener previamente la matriz de admitancia y conocer el tipo de barra (PV, PQ, SLACK).

Mediante la matriz de admitancias se puede obtener la relación que existe entre los voltajes de cada una de las barras con las corrientes que ingresan a cada nodo, al realizar la inversa de la matriz se obtiene la matriz Y de barra.

Conociendo la Y de barra y el tipo de barra se puede aplicar las ecuaciones de flujo de potencia como se muestra en la ecuación 1.1, que dividen a la potencia activa (P_i) y a la potencia Reactiva (Q_i) en dos ecuaciones lineales.

$$P_i = V_i \sum_{h=1}^n V_m (G_{ih} \cos(\theta_i - \theta_h) + B_{ih} \text{sen}(\theta_i - \theta_h)) \quad (1.1)$$

$$Q_i = V_i \sum_{h=1}^n V_m (G_{ih} \sin(\theta_i - \theta_h) - B_{ih} \cos(\theta_i - \theta_h))$$

Donde:

P_i y Q_i : la potencia activa y reactiva que se tiene en la barra i

V_i y θ_i : la magnitud y ángulo del voltaje que se tiene en la barra i

G_{ih} y B_{ih} : La conductancia y susceptancia de la Y de barra

En la ecuación 1.2 se muestra el balance de potencia que se debe realizar entre la generación y la carga buscando que ΔQ y ΔP sean cero en las barras

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= (P_{Gi} - P_{Di}) - P_i \\ \Delta Q_i &= (Q_{Gi} - Q_{Di}) - Q_i \end{aligned} \quad (1.2)$$

Con las ecuaciones 1.1 y 1.2 que se mostraron anteriormente, se puede llegar a la construcción de la matriz jacobiana, ya que para sus cálculos se necesita los datos de voltaje en las barras, los ángulos en las barras y además los datos de la matriz Y de barra del sistema, además se debe considerar que la potencia activa y la potencia reactiva generada no tiene incidencia en la matriz jacobiana, debido a que se interpretan como constante, pero se debe tener en cuenta la variación que existe entre el ángulo y el voltaje.

En la ecuación 1.3 se muestra la composición de la matriz jacobiana, la cual está constituida por:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \vdots & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \vdots & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Donde:

$\left(\frac{\partial P}{\partial \theta}\right)$ La variación de la potencia activa respecto a la variación del ángulo

$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)$ La variación de la potencia activa respecto al voltaje

$\left(\frac{\partial Q}{\partial \theta}\right)$ La variación de la potencia reactiva respecto al ángulo

$\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ La variación de la potencia reactiva respecto al voltaje

1.4.3.1 Matriz Jacobiana reducida

La matriz jacobiana reducida proviene de la matriz jacobiana completa de la ecuación (1.3) donde solo se toma el elemento (4,4) de la matriz, al construir la matriz jacobiana reducida se asume que no existe variación de la potencia activa en el sistema y solo existe la variación de potencia reactiva respecto a la variación del voltaje $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$, en la ecuación 1.4 se muestra la representación de la matriz jacobiana reducida[9].

$$\Delta Q = J_R \Delta V \quad (1.4)$$

Cuando se realiza la división de la matriz jacobiana a la matriz jacobiana reducida se está tomando en cuenta solo una parte del flujo de potencia mediante Newton-Raphson, permitiendo llegar a un modelo de desacoplado rápido, con lo cual se puede efectuar un estudio de sensibilidad de voltaje, las ecuaciones que permiten construir la matriz jacobiana reducida se muestran en la ecuación 1.5 y 1.6

La ecuación 1.5 permite calcular los elementos de la diagonal de la matriz

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = V_i (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (1.5)$$

Las ecuaciones 1.6 permite calcular los elementos fuera de la diagonal de la matriz

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = \sum_{j=1}^n (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) V_j - B_{ii} V_i^2 \quad (1.6)$$

Donde:

V_i y θ_{ij} son los valores de voltaje y ángulo que son proporcionados a partir del cálculo del flujo de potencia.

G_{ij} y B_{ij} La admitancia y la susceptancia de la Y de barra.

Una vez construida la matriz jacobiana reducida se realiza el análisis modal, con lo cual se facilita el estudio de la estabilidad de voltaje del sistema, mediante el cálculo de los autovalores y autovectores izquierdo y derechos de la matriz.

Para poder tener una perspectiva de la estabilidad de voltaje de un sistema se calcula los autovalores propios de la matriz (λ_i) .

Donde:

- Si $\lambda_i > 0$, en este caso la variación que existe entre la potencia reactiva y el voltaje se encuentran el mismo sentido, es decir, si una aumenta la potencia reactiva el voltaje debe aumentar y por consecuencia el sistema está en estabilidad.
- Si $\lambda_i < 0$ la variación que existe entre la potencia activa y el voltaje están en sentidos contrarios el sistema está en inestabilidad.
- Si $\lambda_i = 0$ el sistema puede llegar al colapso.

Para que el sistema eléctrico se encuentre en estabilidad de voltaje siempre se debe tener todos los autovalores propios de la matriz los cuales deben ser mayor que cero ($\lambda_i > 0$)

1.4.4 FLUJO EXTENDIDO DE POTENCIA

Para el análisis de flujos de potencia mediante los diferentes métodos que existe, siempre se ha utilizado como datos de entrada las barras PV, PQ y la barra Slack, teniendo como variables conocidas o desconocidas dependiendo del sistema, el voltaje (V), el ángulo (θ), la potencia activa (P) y la potencia reactiva (Q).

En el flujo extendido de potencia toma en cuenta una redefinición de las barras tradicional del sistema convirtiéndoles en barras PVQ, P, QV θ , para el cual se debe tener en cuenta que el número de variable desconocidas deben ser iguales al número de ecuaciones para que el sistema pueda tener solución. La nueva barra PVQ que aparece en el sistema va a estar controlada por un grupo de generadores de forma remota, y la barra PV pasa a ser una barra P ya que la potencia reactiva de la barra va a ser controlada por la nueva barra PQV en la Figura 1.3 se muestra el tipo de barra con sus variables conocidas y desconocidas.

Bus type		Data inputs	Unknown variables
SL		V, δ	P, Q
PQ		P, Q	V, δ
PV		P, V	δ, Q
Coupled	P	P, K	V, δ, Q
	PVQ	P, V, Q	δ

Figura 1.3. Tipos de barras para el flujo extendido de potencia.

1.4.5 DIVISIÓN EN ÁREAS DINÁMICAS

El control de voltaje en los sistemas eléctricos de potencia se ha tornado complicado ya que se dispone de un gran número de barras e interconexiones entre bahías es por ello, por lo que el control secundario de voltaje propone dividir al sistema en áreas dinámicas permitiendo tener un control focalizado.

Para la división de áreas dinámicas existe diferentes métodos heurísticos y determinísticos, que permiten reducir la complejidad del control de voltaje, principalmente al dividir al sistema en áreas dinámica se espera que al realizar una acción sobre un área no tenga repercusión en otra área del sistema, es decir que el control sea independiente, a continuación, se menciona algunos métodos para la selección de áreas dinámicas

- Matriz jacobiana reducida
- Algoritmo de optimización k-means
- Algoritmo de Fuzzy C-means
- Distancia eléctrica

1.4.6 NODOS PILOTOS

Los sistemas de potencia al ser extensos (con gran cantidad de barras), provocan que el manejo de información sobre sus niveles de voltaje en cada barra se vuelve una tarea complicada, donde surge el control secundario de voltaje, generando al sistema una segmentación en áreas de control y además proporcionando una barra representativa del área[10].

Los nodos piloto al ser una la barra representativa del sistema permite tener observabilidad y controlabilidad de un área específica, es decir, si en el nodo piloto se incrementa potencia reactiva los niveles de voltaje en el área controlada deben aumentar, en la figura 1.4 se muestra la ubicación de los nodos pilotos.

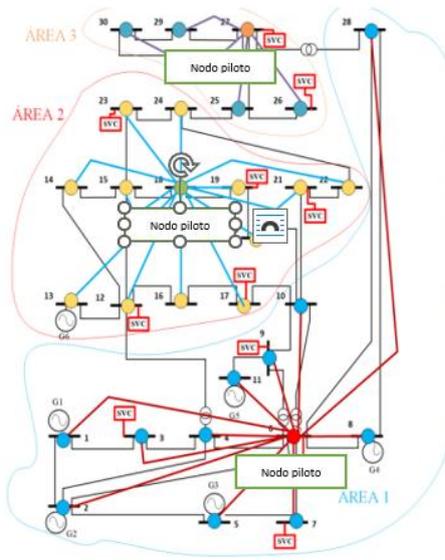


Figura 1.4. Ubicación de nodos pilotos.[10]

En la Figura 1.4 muestra que para la elección de los nodos pilotos se debe tener previamente una división de áreas dinámicas debido a que el nodo piloto que se asigne es el encargado de entregar información sobre niveles de voltaje del área a controlar, cabe mencionar que un nodo piloto únicamente puede ser una barra PQ (de carga).

2. METODOLOGÍA

En el presente ítem se abordará el procedimiento que se realizó para obtener las áreas dinámicas y los nodos pilotos del sistema IEEE de 39 el cual se muestra en la Figura 2.1, que dispone de 39 barras y 10 generadores.

Para el primer método, la matriz jacobiana reducida se utilizará el programa Python y mediante código se obtendrá las áreas dinámicas y los nodos piloto que posteriormente serán ubicados en el programa PowerFactory, con lo cual se realizar simulaciones en los 3 puntos de operación, demanda mínima, demanda máxima y demanda media y poder observar los niveles de voltaje antes de aplicar la metodología y luego de aplicarla. Para la metodología del flujo extendido de potencia se utilizará el programa PowerFactory y mediante simulaciones se seleccionará los nodos pilotos en los tres puntos de operación antes mencionados.

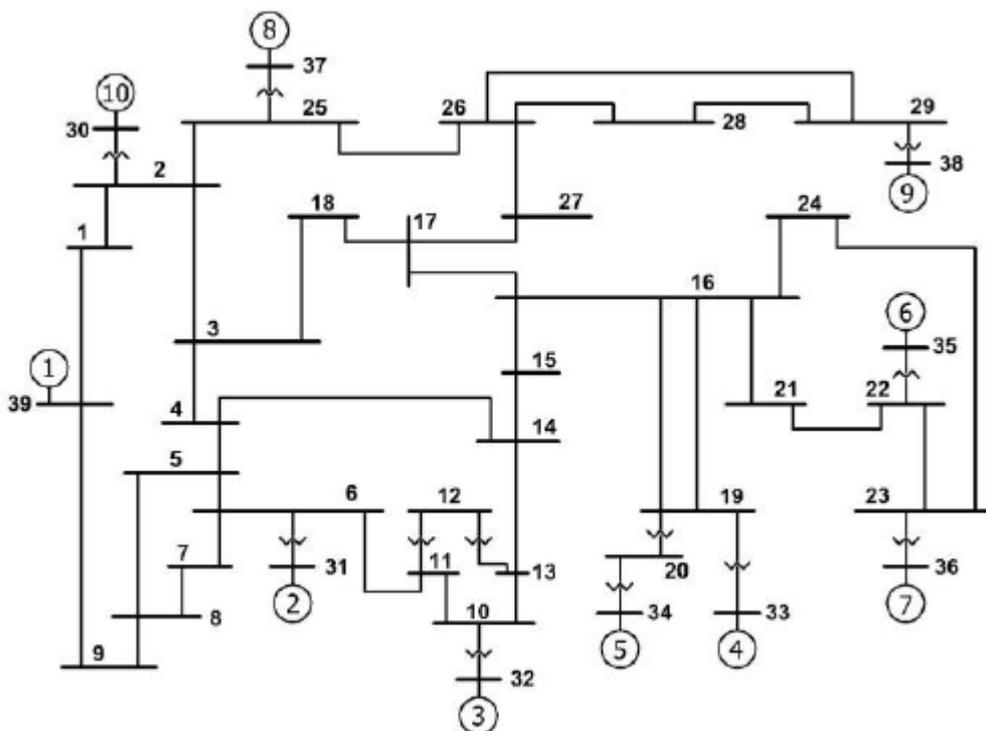


Figura 2.1. Sistema de 39 barras.[10]

2.1 MATRIZ JACOBINA REDUCIDA

Al utilizar Python para sistemas eléctricos de potencia se debe importar algunas librerías que permitan el manejo de datos como la librería NumPy que permite leer arreglos en forma de matrices y además facilita realizar operaciones básicas entre ellas. Para el desarrollo de esta metodología al ser necesario calcular determinantes, autovalores izquierdos,

autovalores derechos, se debe importar la librería “scipy” la cual permite realizar cálculos de algebra lineal de forma fácil y rápida, dicha librería facilita el trabajo con matrices porosas (con muchos huecos entre sus elementos).

Para la aplicación del método de la matriz jacobina se utilizó la librería “pypower” que esta desarrollada en Phyton, la cual permite correr flujos de potencia mediante su submodulo runpf, para ello previamente se debe ingresar los datos del sistema de 39 barras de la IEEE de manera ordena, de esta manera: los datos de barras que muestra en la Figura 2.2, los datos de generación que se muestran en la Figura 2.3 y los datos de las líneas que conectan a las barras que se muestra en la Figura 2.4

```
# bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax Vmin
ppc["bus"] = array([
[1, 1, 97.6, 44.2, 0, 0, 2, 1.0393836, -13.536602, 345, 1, 1.06, 0.94],
[2, 1, 0, 0, 0, 0, 2, 1.0484941, -9.7852666, 345, 1, 1.06, 0.94],
[3, 1, 322, 2.4, 0, 0, 2, 1.0307077, -12.276384, 345, 1, 1.06, 0.94],
[4, 1, 500, 184, 0, 0, 1, 1.00446, -12.626734, 345, 1, 1.06, 0.94],
[5, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1.0060063, -11.192339, 345, 1, 1.06, 0.94],
[6, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1.0082256, -10.40833, 345, 1, 1.06, 0.94],
[7, 1, 233.8, 84, 0, 0, 1, 0.99839728, -12.755626, 345, 1, 1.06, 0.94],
[8, 1, 522, 176.6, 0, 0, 1, 0.99787232, -13.335844, 345, 1, 1.06, 0.94],
[9, 1, 6.5, -66.6, 0, 0, 1, 1.038332, -14.178442, 345, 1, 1.06, 0.94],
[10, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1.0178431, -8.170875, 345, 1, 1.06, 0.94],
[11, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1.0133858, -8.9369663, 345, 1, 1.06, 0.94],
[12, 1, 8.53, 88, 0, 0, 1, 1.000815, -8.9988236, 345, 1, 1.06, 0.94],
[13, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1.014923, -8.9299272, 345, 1, 1.06, 0.94],
[14, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1.012319, -10.715295, 345, 1, 1.06, 0.94],
[15, 1, 320, 153, 0, 0, 3, 1.0161854, -11.345399, 345, 1, 1.06, 0.94],
[16, 1, 329, 32.3, 0, 0, 3, 1.0325203, -10.033348, 345, 1, 1.06, 0.94],
[17, 1, 0, 0, 0, 0, 2, 1.0342365, -11.116436, 345, 1, 1.06, 0.94],
[18, 1, 158, 30, 0, 0, 2, 1.0315726, -11.986168, 345, 1, 1.06, 0.94],
[19, 1, 0, 0, 0, 0, 3, 1.0501068, -5.4100729, 345, 1, 1.06, 0.94],
[20, 1, 680, 103, 0, 0, 3, 0.99101054, -6.8211783, 345, 1, 1.06, 0.94],
[21, 1, 274, 115, 0, 0, 3, 1.0323192, -7.6287461, 345, 1, 1.06, 0.94],
[22, 1, 0, 0, 0, 0, 3, 1.0501427, -3.1831199, 345, 1, 1.06, 0.94],
[23, 1, 247.5, 84.6, 0, 0, 3, 1.0451451, -3.3812763, 345, 1, 1.06, 0.94],
[24, 1, 308.6, -92.2, 0, 0, 3, 1.038001, -9.9137585, 345, 1, 1.06, 0.94],
[25, 1, 224, 47.2, 0, 0, 2, 1.0576827, -8.3692354, 345, 1, 1.06, 0.94],
[26, 1, 139, 17, 0, 0, 2, 1.0525613, -9.4387696, 345, 1, 1.06, 0.94],
[27, 1, 281, 75.5, 0, 0, 2, 1.0383449, -11.362152, 345, 1, 1.06, 0.94],
[28, 1, 206, 27.6, 0, 0, 3, 1.0503737, -5.9283592, 345, 1, 1.06, 0.94],
[29, 1, 283.5, 26.9, 0, 0, 3, 1.0501149, -3.1698741, 345, 1, 1.06, 0.94],
[30, 2, 0, 0, 0, 0, 2, 1.0499, -7.3704746, 345, 1, 1.06, 0.94],
[31, 3, 9.2, 4.6, 0, 0, 1, 0.982, 0, 345, 1, 1.06, 0.94],
[32, 2, 0, 0, 0, 0, 1, 0.9841, -0.1884374, 345, 1, 1.06, 0.94],
[33, 2, 0, 0, 0, 0, 3, 0.9972, -0.19317445, 345, 1, 1.06, 0.94],
[34, 2, 0, 0, 0, 0, 3, 1.0123, -1.631119, 345, 1, 1.06, 0.94],
[35, 2, 0, 0, 0, 0, 3, 1.0494, 1.7765069, 345, 1, 1.06, 0.94],
[36, 2, 0, 0, 0, 0, 3, 1.0636, 4.4684374, 345, 1, 1.06, 0.94],
[37, 2, 0, 0, 0, 0, 2, 1.0275, -1.5828988, 345, 1, 1.06, 0.94],
[38, 2, 0, 0, 0, 0, 3, 1.0265, 3.8928177, 345, 1, 1.06, 0.94],
[39, 2, 1104, 250, 0, 0, 1, 1.03, -14.535256, 345, 1, 1.06, 0.94]
```

Figura 2.2. Datos de barra del sistema de 39 barras.

```

# bus, Pg, Qg, Qmax, Qmin, Vg, mBase, status, Pmax, Pmin, Pc1, Pc2,
# Qc1min, Qc1max, Qc2min, Qc2max, ramp_agc, ramp_10, ramp_30, ramp_q, apf
ppc["gen"] = array([
[30, 250, 161.762, 400, 140, 1.0499, 100, 1, 1040, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
[31, 677.871, 221.574, 300, -100, 0.982, 100, 1, 646, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
[32, 650, 206.965, 300, 150, 0.9841, 100, 1, 725, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
[33, 632, 108.293, 250, 0, 0.9972, 100, 1, 652, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
[34, 508, 166.688, 167, 0, 1.0123, 100, 1, 508, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
[35, 650, 210.661, 300, -100, 1.0494, 100, 1, 687, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
[36, 560, 100.165, 240, 0, 1.0636, 100, 1, 580, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
[37, 540, -1.36945, 250, 0, 1.0275, 100, 1, 564, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
[38, 830, 21.7327, 300, -150, 1.0265, 100, 1, 865, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
[39, 1000, 78.4674, 300, -100, 1.03, 100, 1, 1100, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
])

```

Figura 2.3. datos de generación del sistema de 39 barras.

```

## branch data
# fbus, tbus, r, x, b, rateA, rateB, rateC, ratio, angle, status, angmin, angmax
ppc["branch"] = array([
[1, 2, 0.0035, 0.0411, 0.6987, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[1, 39, 0.001, 0.025, 0.75, 1000, 1000, 1000, 0, 0, 1, -360, 360],
[2, 3, 0.0013, 0.0151, 0.2572, 500, 500, 500, 0, 0, 1, -360, 360],
[2, 25, 0.007, 0.0086, 0.146, 500, 500, 500, 0, 0, 1, -360, 360],
[2, 30, 0, 0.0181, 0, 900, 900, 2500, 1.025, 0, 1, -360, 360],
[3, 4, 0.0013, 0.0213, 0.2214, 500, 500, 500, 0, 0, 1, -360, 360],
[3, 18, 0.0011, 0.0133, 0.2138, 500, 500, 500, 0, 0, 1, -360, 360],
[4, 5, 0.0008, 0.0128, 0.1342, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[4, 14, 0.0008, 0.0129, 0.1382, 500, 500, 500, 0, 0, 1, -360, 360],
[5, 6, 0.0002, 0.0026, 0.0434, 1200, 1200, 1200, 0, 0, 1, -360, 360],
[5, 8, 0.0008, 0.0112, 0.1476, 900, 900, 900, 0, 0, 1, -360, 360],
[6, 7, 0.0006, 0.0092, 0.113, 900, 900, 900, 0, 0, 1, -360, 360],
[6, 11, 0.0007, 0.0082, 0.1309, 480, 480, 480, 0, 0, 1, -360, 360],
[6, 31, 0, 0.025, 0, 1800, 1800, 1800, 1.07, 0, 1, -360, 360],
[7, 8, 0.0004, 0.0046, 0.078, 900, 900, 900, 0, 0, 1, -360, 360],
[8, 9, 0.0023, 0.0363, 0.3804, 900, 900, 900, 0, 0, 1, -360, 360],
[9, 39, 0.001, 0.025, 1.2, 900, 900, 900, 0, 0, 1, -360, 360],
[10, 11, 0.0004, 0.0043, 0.0729, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[10, 13, 0.0004, 0.0043, 0.0729, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[10, 32, 0, 0.02, 0, 900, 900, 2500, 1.07, 0, 1, -360, 360],
[12, 11, 0.0016, 0.0435, 0, 500, 500, 500, 1.006, 0, 1, -360, 360],
[12, 13, 0.0016, 0.0435, 0, 500, 500, 500, 1.006, 0, 1, -360, 360],
[13, 14, 0.0009, 0.0101, 0.1723, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[14, 15, 0.0018, 0.0217, 0.366, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[15, 16, 0.0009, 0.0094, 0.171, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[16, 17, 0.0007, 0.0089, 0.1342, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[16, 19, 0.0016, 0.0195, 0.304, 600, 600, 2500, 0, 0, 1, -360, 360],
[16, 21, 0.0008, 0.0135, 0.2548, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[16, 24, 0.0003, 0.0059, 0.068, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[17, 18, 0.0007, 0.0082, 0.1319, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[17, 27, 0.0013, 0.0173, 0.3216, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[19, 20, 0.0007, 0.0138, 0, 900, 900, 2500, 1.06, 0, 1, -360, 360],
[19, 33, 0.0007, 0.0142, 0, 900, 900, 2500, 1.07, 0, 1, -360, 360],
[20, 34, 0.0009, 0.018, 0, 900, 900, 2500, 1.009, 0, 1, -360, 360],
[21, 22, 0.0008, 0.014, 0.2565, 900, 900, 900, 0, 0, 1, -360, 360],
[22, 23, 0.0006, 0.0096, 0.1846, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[22, 35, 0, 0.0143, 0, 900, 900, 2500, 1.025, 0, 1, -360, 360],
[23, 24, 0.0022, 0.035, 0.361, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[23, 36, 0.0005, 0.0272, 0, 900, 900, 2500, 1, 0, 1, -360, 360],
[25, 26, 0.0032, 0.0323, 0.531, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[25, 37, 0.0006, 0.0232, 0, 900, 900, 2500, 1.025, 0, 1, -360, 360],
[26, 27, 0.0014, 0.0147, 0.2396, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[26, 28, 0.0043, 0.0474, 0.7802, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[26, 29, 0.0057, 0.0625, 1.029, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[28, 29, 0.0014, 0.0151, 0.249, 600, 600, 600, 0, 0, 1, -360, 360],
[29, 38, 0.0008, 0.0156, 0, 1200, 1200, 2500, 1.025, 0, 1, -360, 360]
])

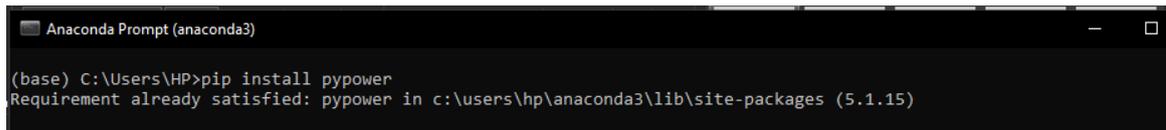
```

Figura 2.4. Datos de línea del sistema de 39 barras.

Con los datos ingresados de la Figuras 2.2, 2.3 y 2.4 se guardan como librerías, permitiendo modificar la demanda de las cargas de cada barra, a demanda media (datos iniciales del sistema), demanda mínima (se multiplico por un factor de 0.5 a las cargas de las barras) y demanda máxima (se multiplico por un factor de 1.35 a las cargas de las barras) obtenido los datos para los tres puntos de operación del sistema, con los cuales se

correré flujos de potencia mediante diferentes métodos como, Gauss Seidel, desacoplada rápido y Newton Rapson, siendo el ultimo el que se considera para desarrollar la metodología de la matriz jacobiana reducida.

Previo a la utilización de la librería “pypower” deber ser instalada desde anaconda Promp mediante el comando “*pip install pypower*”, ya que no se encuentra por defecto en Phyton y no permite importar la librería. En la Figura 2.5 se muestra su instalación.



```
Anaconda Prompt (anaconda3)
(base) C:\Users\HP>pip install pypower
Requirement already satisfied: pypower in c:\users\hp\anaconda3\lib\site-packages (5.1.15)
```

Figura 2.5. Instalación de la librería pypower.

Tanto en la subrutina runpf y newtonpf al ser de edición libre se ha realizado modificaciones para que se pueda tener como variables de salida los datos de la matriz jacobina completa del sistema, la cual será utilizada para poder obtener la matriz jacobiana reducida, que permite realizar el análisis de sensibilidad de voltaje, debido a que relaciona la variación de potencia reactiva respecto a la variación de voltaje.

2.1.1 OBTENCION DE LA MATRIZ JACOBINA Y AUTOVALORES

Al utilizar el submodulo newtonpf y al modificarlo se puede obtener la matriz jacobiana completa dividida en 4 submatrices J11, J12, J21 y J22 de la cual se utilizó la matriz J22 que pertenece a la variación de potencia reactiva respecto a la variación de voltaje, en la Figura 2.6 se muestra la modificación que se han realizado para la obtención de la matriz jacobiana reducida.

```
dS_dVm, dS_dVa = dSbus_dV(Ybus, V)

J11 = dS_dVa[array([pvpq]).T, pvpq].real
J12 = dS_dVm[array([pvpq]).T, pq].real
J21 = dS_dVa[array([pq]).T, pvpq].imag
J22 = dS_dVm[array([pq]).T, pq].imag
```

Figura 2.6. obtención de la matriz jacobiana

Una vez que se ha ubicado la matriz jacobiana reducida se puede calcular los autovalores del sistema mediante la ecuación 2.1 en la cual se debe restar a la matriz jacobiana un valor de landa por la matriz identidad.

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

$$\begin{bmatrix} J_{22_{1_1}} - \lambda_1 & \cdots & J_{22_{1_39}} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ J_{22_{39_1}} & \cdots & J_{22_{39_39}} - \lambda_{39} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

El número de autovalores resultantes será igual al número de barras que disponga el sistema, en este caso de estudio que se está analizando al ser de 39 barras se tendrá 39 autovalores. Como una primera aproximación de la estabilidad de voltaje se puede observar que todos los valores sean positivos, pero si un solo valor llegase a ser negativo el sistema estaría en inestabilidad.

Para la aplicación en Python se utiliza la librería “*numpy.linalg.ei()*” que proporciona los autovalores de cualquier matriz de n dimensiones.

2.1.2 ENERGIA DE LA MATRIZ Y DETERMINACION DE AREAS

Una vez que se encontró los autovalores se los debe ordenar de forma descendente como se muestra en la ecuación 2.2, la cual proporciona la energía total de la matriz

$$E(J_{22}) = \sum_{i=1}^n |\lambda_i(J_{22})| = |\lambda_1| + |\lambda_2| + \cdots + |\lambda_{39}| \quad (2.2)$$

Donde:

$\lambda_i(J_{22})$ es cada autovalor de cada barra de la matriz jacobina reducida.

Para determinar las áreas dinámicas del sistema se utiliza la metodología de mayor energía modal, la cual establece que el criterio va entre el 80% y el 99% de la energía capturada dependiendo del sistema, es decir para un sistema pequeño es utilizado la mayor energía modal (lo más cercano al 99%) y para sistemas grandes según [5], se utiliza entre el 80% y 90% de la energía capturada siendo lo adecuado, para este caso de estudio se tomó el 80% de la energía capturada. En la ecuación 2.2 se muestra la forma de calcular las áreas dinámicas

$$E_{Nn} = \sum_{i=1}^n \frac{|\lambda_i(J_{22})|^2}{|\Lambda|^2} \quad (2.2)$$

$$\# \text{ de areas} = \frac{\lambda_1^2 + \dots + \lambda_n^2}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \dots + \lambda_{39}^2}$$

Donde:

E_{Nn} es la energía capturada hasta el nodo n

$\lambda_1^2 + \dots + \lambda_n^2$ es la suma cuadrada de cada autovalor en forma descendente hasta llegar al valor de la energía capturada que se estableció.

$\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \dots + \lambda_{39}^2$ es la suma cuadrada de cada uno de los autovalores previamente encontrados.

2.1.3 CALCULO DE LOS AUTOVALORES IZQUIERDOS Y DERECHOS

Una vez que se dispone del número de áreas en el sistema se puede encontrar los nodos pilotos de cada área, para ello se debe encontrar los autovectores derechos que al realizar su inversa proporcionan los autovectores izquierdos, en la ecuación 2.3 y 2.4 se muestra el cálculo de los autovectores derechos e izquierdos.

$$\det(J - \lambda I)\varphi = 0 \quad (2.3)$$

$$= \begin{bmatrix} \varphi_{1,1} & \dots & \varphi_{1,39} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \varphi_{39,1} & \dots & \varphi_{39,39} \end{bmatrix}$$

$$\varphi^{-1} = \psi \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{1,1} & \dots & \psi_{1,39} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \psi_{39,1} & \dots & \psi_{39,39} \end{bmatrix}$$

En Python para el cálculo de los autovectores derechos se utiliza la función “*np.linalg.eig()*” que además de proporcionar los autovalores facilita los autovectores derechos y mediante la inversa de esta matriz se obtienen los autovalores izquierdos, esto se realiza con la función “*np.linalg.inv()*”

2.1.4 CALCULO DE LA MATRIZ REDUCIDA, ELECCION DE NODOS PILOTOS Y BARRAS PARA CADA AREA.

Con la matriz de autovectores izquierdos, se puede calcular la matriz n_{ij} (matriz de participación) que se muestra en el Anexo 1, este cálculo se realizó mediante la ecuación 2.5 que se muestra a continuación.

$$n_{ij} = \begin{bmatrix} n_{1_1} & \dots & n_{1_{39}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ n_{39_1} & \dots & n_{39_{39}} \end{bmatrix} = \frac{\psi_{ij}^2}{\|\psi_{ij}\|^2} * 100\% \quad (2.5)$$

Donde

ψ_{ij} Cada elemento elevado al cuadrado de la fila de la matriz de autovectores izquierdos

$\|\psi_{ij}\|^2$ la suma de cada elemento de la fila de la matriz de autovectores izquierdos (norma del vector).

Y se calcula de la siguiente manera

$$n_{1j} = \frac{[\psi_{1j}^2 \quad \psi_{2j}^2 \quad \psi_{3j}^2 \quad \dots \quad \psi_{39j}^2]}{\psi_{1j}^2 + \psi_{2j}^2 + \psi_{3j}^2 + \dots + \psi_{39j}^2}$$

Obtenida la matriz n_{ij} que se debe reemplazar en la ecuación 2.6 la cual permite obtener la matriz n_{Rij}

$$n_{Rij} = \frac{E_{Ni} * n_{ij}}{100} \quad (2.6)$$

En la ecuación 2.7 se muestra la forma de calcular la energía de cada autovalor

$$E_{Ni} = \frac{(\lambda_i(J_{Qv}))^2}{||\Lambda||^2} \quad (2.7)$$

Calculándose de la siguiente manera

$$E_{N1} = \frac{(\lambda_1(J_{Qv}))^2}{||\Lambda||^2} = \frac{\lambda_1^2}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \dots + \lambda_{39}^2}$$

$$E_{N2} = \frac{(\lambda_2(J_{Qv}))^2}{||\Lambda||^2} = \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \dots + \lambda_{39}^2}$$

$$E_{N39} = \frac{(\lambda_{39}(J_{Qv}))^2}{||\Lambda||^2} = \frac{\lambda_{39}^2}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \dots + \lambda_{39}^2}$$

Una vez que se forma la matriz n_{Rij} se puede encontrar la matriz n_{Rij} – reducida la cual facilita localizar los nodos pilotos de cada área, para poder ubicar esta matriz se debe saber en cuántas áreas se estableció en el sistema, es decir, si en el sistema de 39 barras se determinaron 8 áreas, para llegar a ese número de áreas se tuvieron que haber utilizado 8 de los 39 autovalores los cuales estaban ordenados de forma descendente, dando como resultado ya no una matriz n_{Rij} de 39 por 39 sino una matriz de 8 por 39 como se muestra a continuación.

$$n_{Rij} - reducida = \begin{bmatrix} a_{1_1} & \dots & a_{1_39} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{8_1} & \dots & a_{8_39} \end{bmatrix}$$

Para la elección de las barras que pertenece a cada área y del nodo piloto, se parte de la matriz n_{Rij} – reducida en la cual se analiza lo siguiente:

- Para la elección de las áreas dinámicas, las columnas de la matriz representan las barras y la fila representa el área, como se muestra en la Figura 2.7, con lo cual se analiza todos los valores de la fila, donde si uno o más elementos están muy cercanos en un valor se toma como barras de esa área, para la siguiente área se analiza nuevamente los valores y se toman uno o más barras que están cercanos

2.2 FLUJO EXTENDIDO DE POTENCIA

El flujo extendido de potencia al no ser el flujo de potencia convencional, se debe modificar las ecuaciones, en donde ya no solo se tiene barras PV y PQ, sino que se tiene barras PVQ y P, debido al control de voltaje, en estas nuevas barras se especifica las potencias inyectadas, tanto activa como reactiva.

Esta metodología al no proporcionar la división de áreas dinámicas, por lo cual se utilizó la división de áreas que previamente se encontró en la metodología de la matriz jacobina reducida, para la elección de los nodos pilotos únicamente se utilizó el programa PowerFactory en el cual se instaló el controlador “Station Control” en cada área, previo a la instalación de este controlador se debe tener en cuenta que los nodos pilotos solo pueden ser aquellos nodos de carga, es decir, barras PQ.

Mediante el controlador “Station Control ” se puede simular un flujo extendido de potencia en el programa PowerFactory sin modificar las ecuaciones internas de flujo de potencia convencional que tiene el programa, en la figura 2.9, 2.10 y 2.11 se muestra su incorporación al sistema, en donde se observa que como parámetros de entrada se debe ingresar el generador o generadores que va a participar del control de voltaje y además la barra que va a ser controlada, permitiendo modificar las barras del sistema, es decir, la barra a controlar ahora ya no será una barra PQ sino una barra PVQ con lo cual se tendría un flujo extendido de potencia .

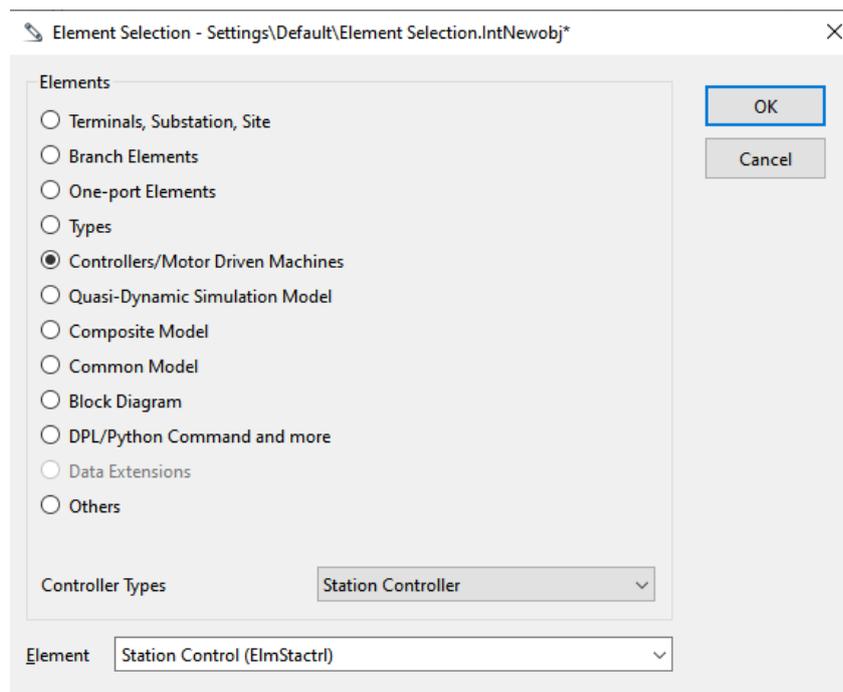


Figura 2.9. Incorporación “Station Control”

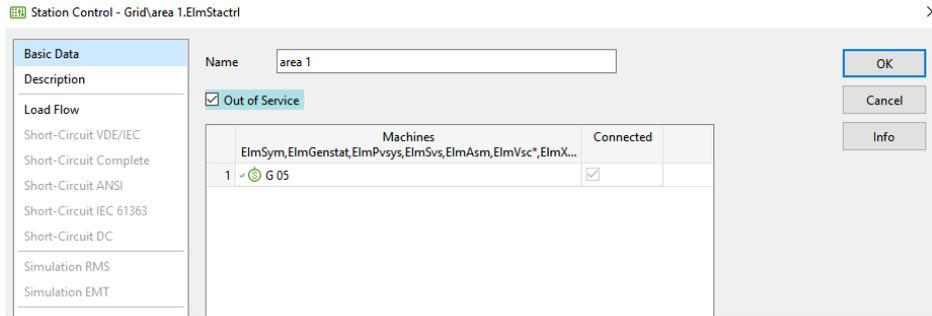


Figura 2.10. Incorporación “Station Control”

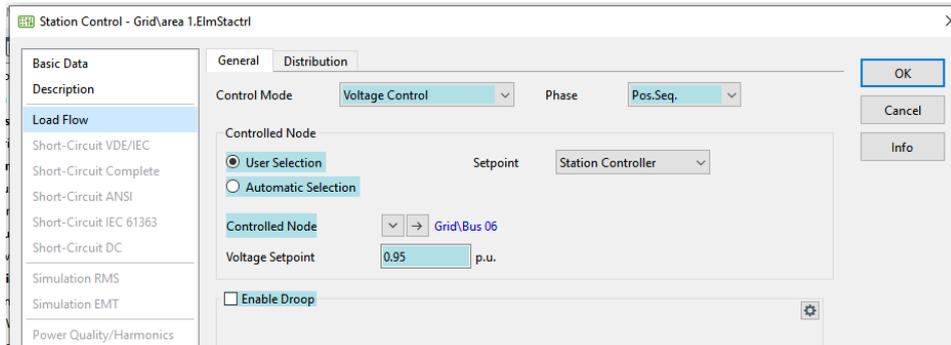


Figura 2.11. Incorporación “Station Control”

Una vez instalado el “Station Control” en cada área, se analiza cada nodo, antes de la instalación del controlador y luego de la instalación, en la figura 2.12 se muestra el área 1 a demanda base

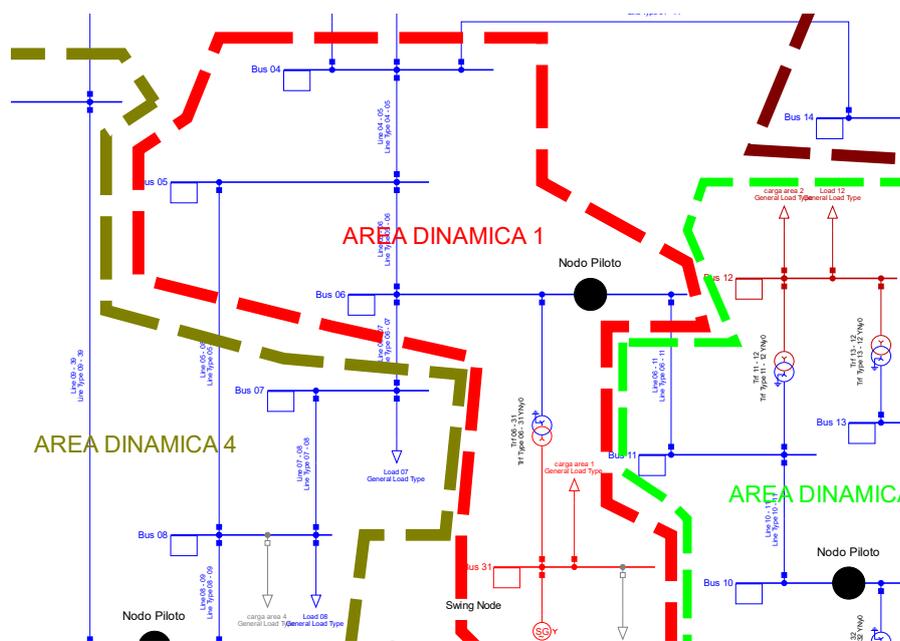


Figura 2.12 Área 1 a demanda base

En la figura 2.10 se puede observar que la barra 4, barra 5 y barra 6 son barras de carga es decir PQ, las cuales podrían ser un posible nodo piloto, mediante la ecuación 2.8 se determinara cuál de las tres barras es el nodo piloto de esa área.

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i^{\text{base}} - V_i)^2 \quad 2.8$$

Donde

n = número de nodos a analizar

V_i^{base} = voltaje inicial en el nodo i

V_i = voltaje en el nodo i luego del flujo extendido de potencia

Para poder aplicar la ecuación 2.8 se debe correr un flujo de potencia convencional y posteriormente incorporar el controlador en cada barra posible a ser nodo piloto, para el conjunto de nodos analizados se observa en cual de todos existe la menor variación y se lo selecciona como nodo piloto, como se muestra en la tabla 2.1, esta tabla se debe realizar para todos los posibles nodos pilotos que existan en esa área, este procedimiento se realiza para cada una de las áreas y cada una de las demandas con lo cual se encontraran todos los nodos pilotos del sistema.

Tabla 2.1. Flujo extendido de potencia área 1 bus 4

Barra	Antes	Después
Bus 4	0.98 p.u	0.98 p.u
Bus 5	0.969 p.u	0.969 p.u
Bus 6	0.968 p.u	0.967 p.u
Bus 31	0.982 p.u	0.981 p.u

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS.

3.1.1 MATRIZ JACOBIANA REDUCIDA

3.1.1.1 demanda base

Mediante el uso del programa Phytion se pudo determinar las áreas dinámicas para el sistema de 39 barras a demanda base (sin modificar las cargas del sistema) obteniendo 7 áreas dinámicas con sus respectivos nodos pilotos los cuales se muestran en la Tabla 3.1

Tabla 3.1. Resultados de la división de áreas a demanda base

Área	Nodo piloto	Barras
1	4	31-6-5-4
2	12	32-13-12-11-10
3	20	33-24-20-19-16-15
4	9	39-9-8-7
5	14	14
6	29	38-37-34-30-29-28-27-26-25-18-17-3-2-1
7	21	36-35-23-22-21

En la Tabla 3.1 se puede observar que en el área numero 5 solo se dispone de una barra de control por lo cual se redefino y se le ubico en un área adyacente (en el área dinámica 3) obtenido 6 áreas de control como se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resultados de la reubicación de áreas

Área	Nodo piloto	Barras
1	4	31-6-5-4
2	12	32-13-12-11-10
3	20	33-24-20-19-16-15-14
4	9	39-9-8-7
5	29	38-37-34-30-29-28-27-26-25-18-17-3-2-1
6	21	36-35-23-22-21

La división de áreas ya implementado en PowerFactory se muestra en la Figura 3.1

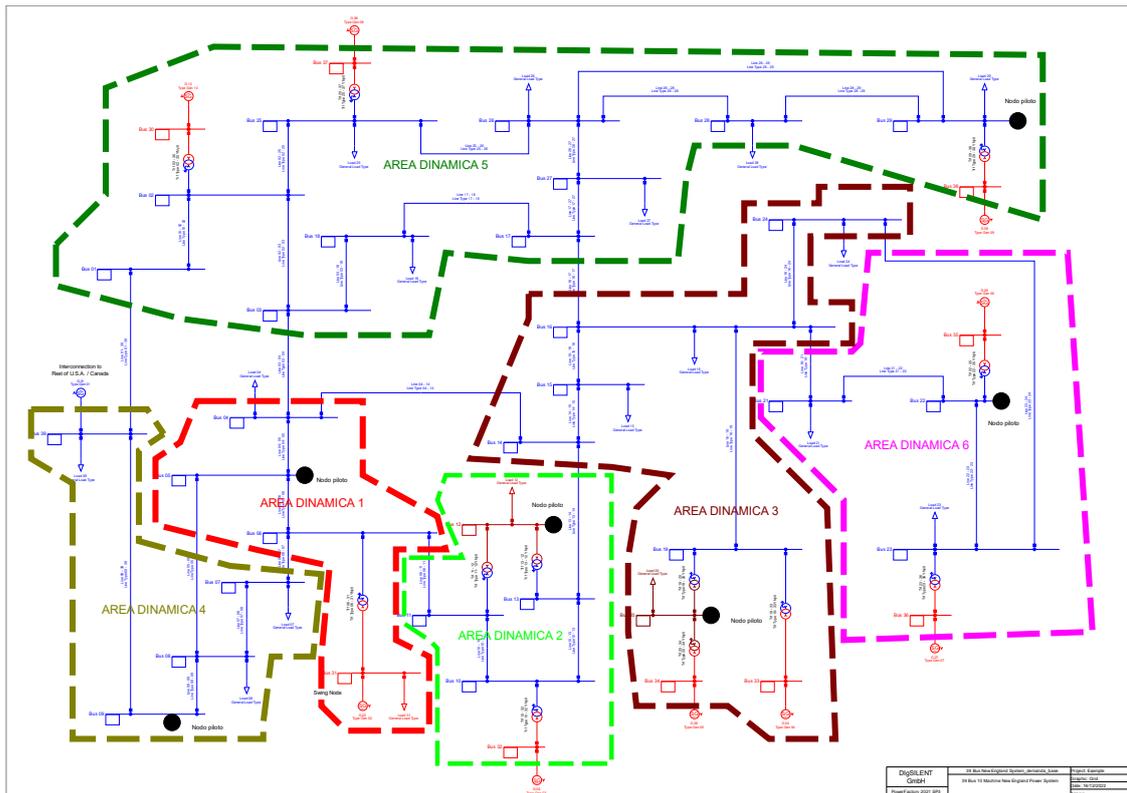


Figura 3.1 División de áreas dinámicas y elección de nodo piloto en el sistema IEEE de 39 barras a demanda base.

Una vez agregadas las áreas dinámicas y los nodos pilotos, para observar los niveles de voltaje se incorporó en cada uno de ellos un controlador propio de PowerFactory llamado “Station Control” el cual se muestra en la Figura 3.2, que permite ingresar el voltaje que se espera tener en la barra piloto. Los límites de los voltajes en barras van de 0.95p.u. a 1.05p.u.

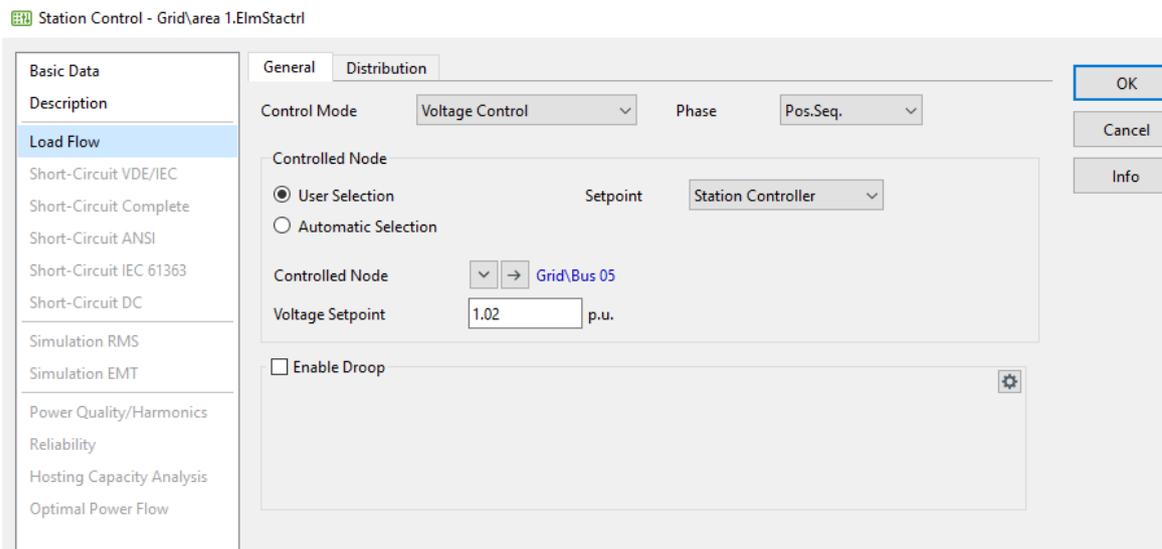


Figura 3.2. Voltaje esperado para el control de voltaje.

Para observar el funcionamiento de las áreas dinámicas y los nodos pilotos se incluyó una carga en cada barra como se muestra en la Tabla 3.3

Tabla 3.3. cargas agregadas al sistema a demanda base

Área	ubicación	Potencia activa	Potencia reactiva
1	Barra 31	3.1 MW	2.1 Mvar
2	Barra 12	11.25 MW	135 Mvar
3	Barra 16	493.5 MW	48.45 Mvar
4	Barra 8	783 MW	264 Mvar
5	Barra 18	237 MW	45 Mvar
6	Barra 23	371.25 MW	126.9 Mvar

En la Tabla 3.4 se muestra los niveles de voltaje de las 6 áreas en cada barra antes de incorporar las áreas dinámicas y nodos piloto y luego de incluirlas, además se incrementó en cada barra las cargas que se indicaron en la Tabla 3.3. Para comprobar que el sistema este distribuido correctamente en sus 6 áreas dinámicas y también que la elección del nodo piloto haya sido el adecuado.

Tabla 3.3. Resultados niveles de voltaje a demanda base.

Área	Barra	Voltaje previo al control de voltaje	Voltaje luego del control de voltaje
1	Barra 4	0.8604 p.u	0.9895 p.u
1	Barra 5	0.8184 p.u	1 p.u
1	Barra 6	0.8192 p.u	1.0100 p.u
1	Barra 31	0.7951 p.u	0.9812 p.u
2	Barra 10	0.8828 p.u	1.0205p.u
2	Barra 11	0.8578 p.u	1.0138p.u
2	Barra 12	0.8112 p.u	0.9669p.u
2	Barra 13	0.8760p.u	1.0099 p.u
2	Barra 32	0.9831p.u	1.0364p.u
3	Barra 15	0.9299p.u	0.9909p.u
3	Barra 16	0.9711p.u	1.0049p.u
3	Barra 19	1.0275p.u	1.0457p.u
3	Barra 20	0.9790 p.u	0.9889p.u
3	Barra 24	0.9813p.u	1.0104p.u
3	Barra 33	0.9972p.u	1.0090p.u
4	Barra 7	0.7951p.u	0.9812p.u
4	Barra 8	0.7916p.u	0.9725p.u
4	Barra 9	0.9435p.u	1.0199p.u
4	Barra 39	1.0299p.u	1.0328p.u
5	Barra 1	1.0367 p.u	1.0369 p.u
5	Barra 2	1.0191 p.u	1.0148 p.u

5	Barra 3	0.9561 p.u	1.0023 p.u
5	Barra 17	0.9702 p.u	1.0035 p.u
5	Barra 18	0.9592 p.u	0.9978 p.u
5	Barra 25	1.0289 p.u	1.0200 p.u
5	Barra 26	1.0145 p.u	1.0241 p.u
5	Barra 27	0.9871 p.u	1.0079 p.u
5	Barra 28	1.0306 p.u	1.0356 p.u
5	Barra 29	1.0366 p.u	1.0400 p.u
5	Barra 30	1.0475 p.u	0.9899 p.u
5	Barra 34	1.0123 p.u	1.0125 p.u
5	Barra 37	1.0278 p.u	0.9929 p.u
5	Barra 38	1.0265 p.u	1.0265 p.u
6	Barra 21	0.9881 p.u	1.0043 p.u
6	Barra 22	1.0224 p.u	1.0200 p.u
6	Barra 23	1.0101 p.u	1.0113 p.u
6	Barra 35	1.0493 p.u	1.0222 p.u
6	Barra 36	1.0635 p.u	1.0534 p.u

En la Tabla 3.3 se puede observar que, si no existe un control secundario de voltaje y se produce un incremento en las cargas, los niveles de voltaje van a caer por debajo de los niveles permitido, pero al tener un control secundario de voltaje se puede observar que el rango del voltaje va a estar dentro de los parámetros permitidos (0.95p.u a 1.05p.u). en la Figura 3.3 se muestra los niveles de voltaje en todas las barras del sistema con la incorporación de las áreas dinámicas y nodos pilotos

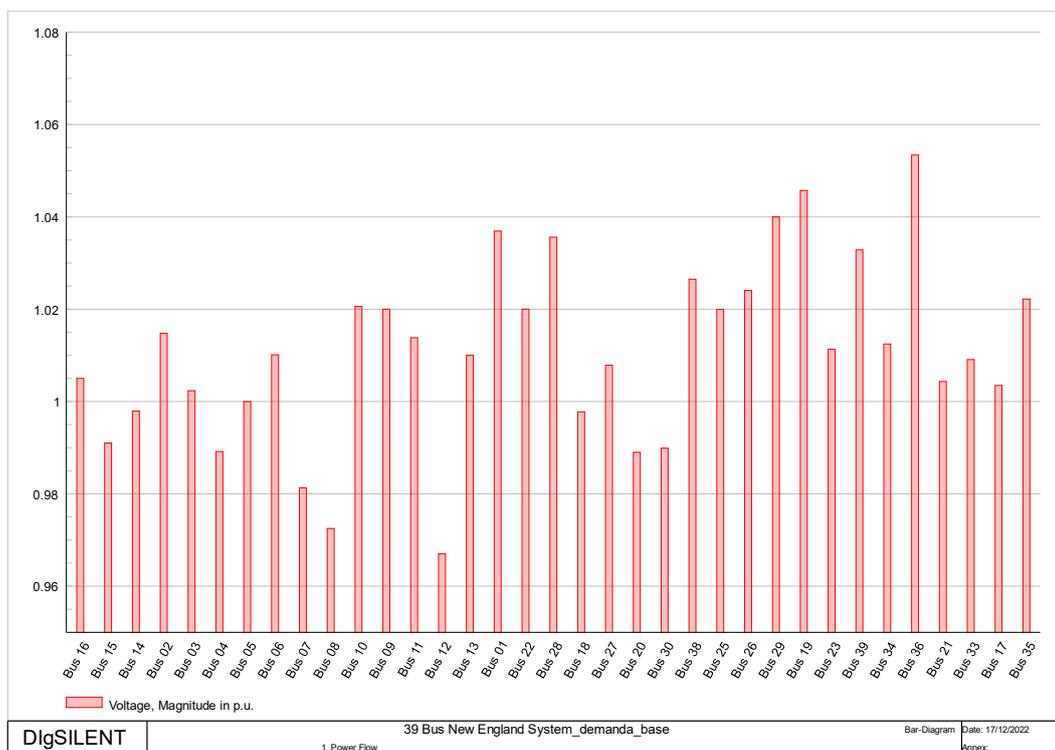


Figura 3.3 Niveles de voltaje del sistema IEEE de 39 barras a demanda base

En la Figura 3.4 se muestra los resultados que se obtuvo al realizar simulaciones de cortocircuito en una barra de cada área antes de tener el control mediante los nodos pilotos (curvas en color rojo) y luego de incorporar el control mediante los nodos pilotos (curvas en color azul)

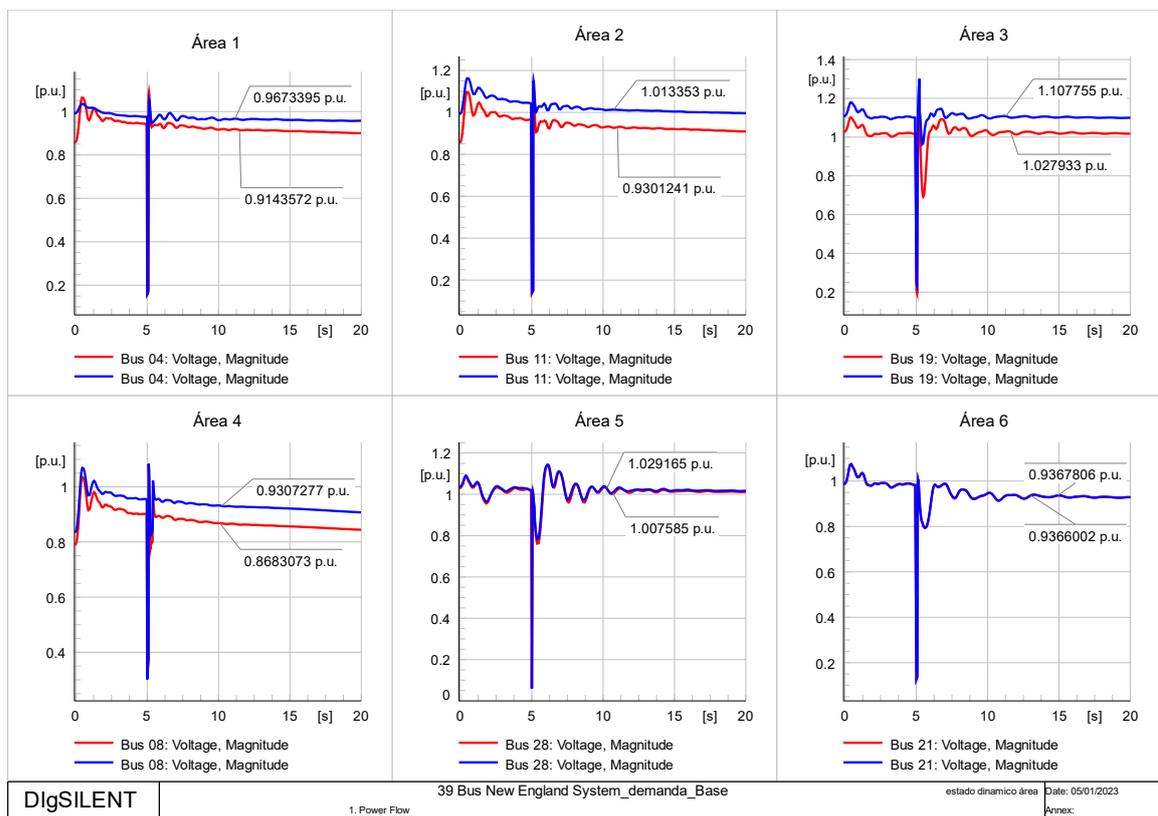


Figura 3.4. Respuesta dinámica del sistema.

3.1.1.2 Demanda máxima

Para el caso de demanda máxima se multiplico a las cargas del todo el sistema por un factor de 1.35 con lo cual se obtuvo la división de las áreas dinámicas y nodos pilotos que se muestra en la Tabla 3.4

Tabla 3.4. División de áreas a demanda máxima

Área	Nodo piloto	Barras
1	5	5-6-31
2	12	10-11-12-13-32
3	20	15-16-19-20-24-33
4	9	7-8-9
5	27	17-18-27-34
6	21	21-22-23-35-36
7	14	14

8	28	1-2-3-4-25-26-28-29-30-37-38-39
---	----	---------------------------------

En la Tabla 3.4 se puede observar que el área 7 solo tiene una barra a controlar la cual se debe reubicar en un área adyacente como se muestra en la Tabla 3.5

Tabla 3.5. Reubicación de las áreas a demanda máxima

Área	Nodo piloto	Barras
1	5	5-6-31
2	12	10-11-12-13-32
3	20	15-16-19-20-24-33
4	9	7-8-9
5	27	17-18-27-34
6	21	21-22-23-35-36
7	28	1-2-3-4-14-25-26-28-29-30-37-38-39

Con las áreas dinámicas ya redefinidas se utilizó el controlador “Station Control” que se mostró en la Figura 3.2, para este caso de estudio se tiene 7 controladores, ya que se dispone de 7 áreas. Para cada área se debe ingresar los generadores que participan en el control y además la barra piloto, cabe mencionar que los generadores no se deben repetir entre las áreas de control, en la Figura 3.5 se muestra un ejemplo de la ubicación de los generadores que participaran en el control secundario de voltaje en el área 7.

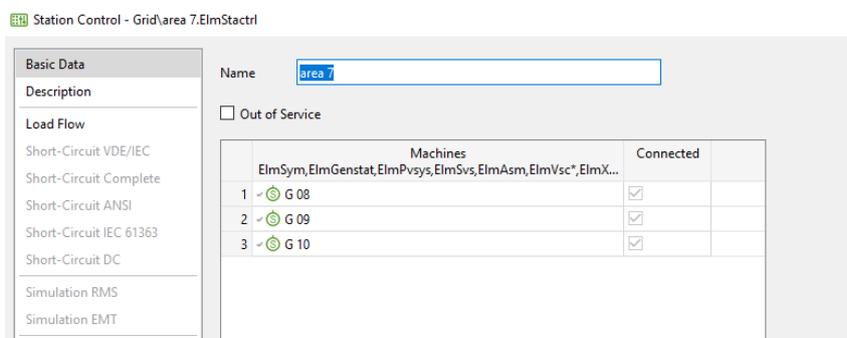


Figura 3.5 Ubicación de generadores para el control de voltaje.

En la Figura 3.6 se muestra la ubicación de las áreas dinámicas y nodos pilotos para demanda máxima en el programa PowerFactory

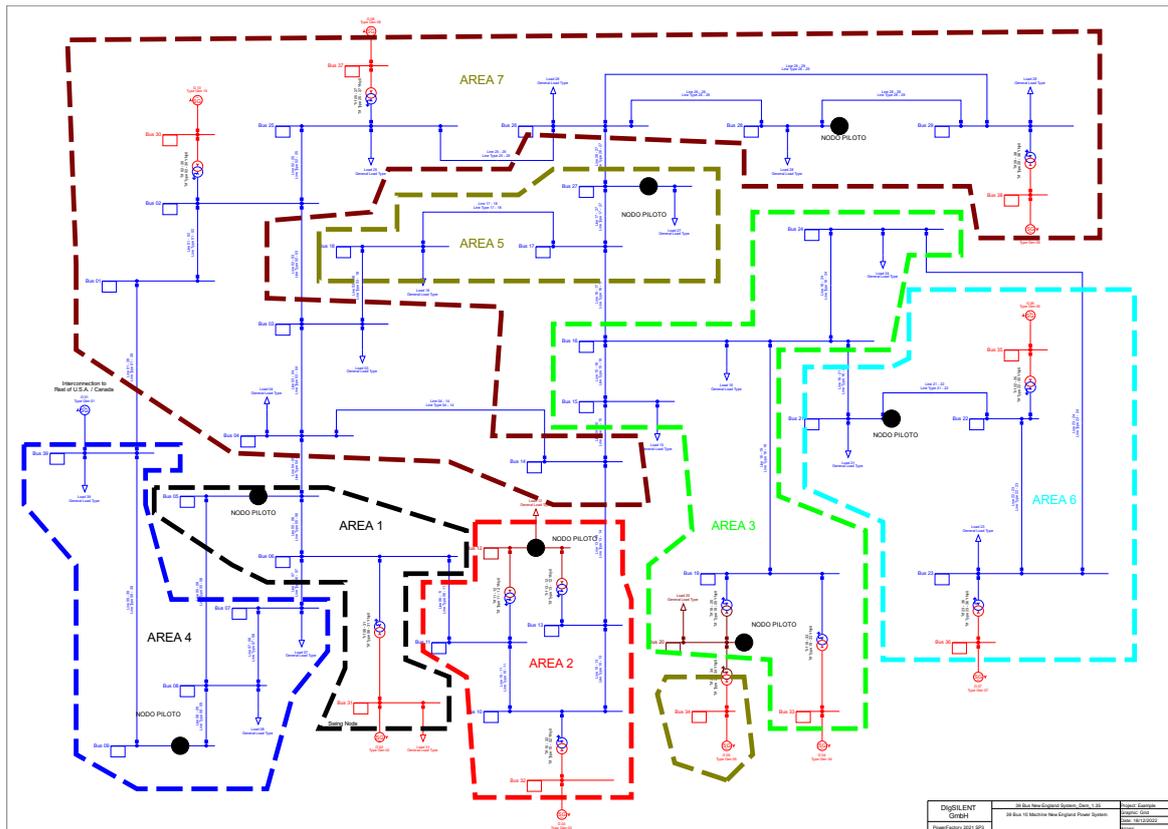


Figura 3.6. División de áreas dinámicas y elección de nodos pilotos a demanda máxima.

Para comprobar los niveles de voltaje se corrió flujo de potencia a demanda máxima (a todas las cargas del sistema se multiplicó por un factor de 1.35) y se obtuvo los voltajes del flujo de potencia y posteriormente se incluyó las áreas dinámicas y los nodos pilotos obteniendo los valores de voltajes en todas las barras del sistema, en la Tabla 3.6 se muestra los resultados.

Tabla 3.6. Resultados de voltajes a demanda máxima

Área	Barra	Voltaje previo al control de voltaje	Voltaje luego del control de voltaje
1	Barra 5	0.8778 p.u	0.9706 p.u
1	Barra 6	0.8798 p.u	0.9749 p.u
1	Barra 31	0.9820 p.u	0.9820 p.u
2	Barra 10	0.9251 p.u	1.0523 p.u
2	Barra 11	0.9081 p.u	1.0246 p.u
2	Barra12	0.8890 p.u	1.0100 p.u
2	Barra 13	0.9182 p.u	1.0352 p.u
2	Barra 32	0.9831 p.u	1.02020 p.u
3	Barra 15	0.9462 p.u	0.9935 p.u
3	Barra 16	0.9847 p.u	1.0114 p.u

3	Barra 19	1.0298 p.u	1.0591 p.u
3	Barra 20	0.9756 p.u	1.0000 p.u
3	Barra 24	0.9951 p.u	1.0172 p.u
3	Barra 33	0.9972 p.u	1.0291 p.u
4	Barra 7	0.8653 p.u	0.9584 p.u
4	Barra 8	0.8664 p.u	0.9573 p.u
4	Barra 9	0.9701 p.u	1.0200 p.u
5	Barra 17	0.9837 p.u	1.0074 p.u
5	Barra 18	0.9769 p.u	1.0027 p.u
5	Barra 27	0.9915 p.u	1.0047 p.u
5	Barra 34	1.0123 p.u	1.0311 p.u
6	Barra 21	0.9935 p.u	1.0031 p.u
6	Barra 22	1.0283 p.u	1.0200 p.u
6	Barra 23	1.0218 p.u	1.0174 p.u
6	Barra 35	1.0493 p.u	1.0167 p.u
6	Barra 36	1.0635 p.u	1.0502 p.u
7	Barra 1	1.0373 p.u	1.0481 p.u
7	Barra 2	1.0237 p.u	1.0198 p.u
7	Barra 3	0.9718 p.u	1.0008 p.u
7	Barra 4	0.8948 p.u	0.9744 p.u
7	Barra 14	0.9137 p.u	1.0043 p.u
7	Barra 25	1.0310 p.u	1.0258 p.u
7	Barra 26	1.0152 p.u	1.0191 p.u
7	Barra 28	1.0244 p.u	1.0200 p.u
7	Barra 29	1.0310 p.u	1.0241 p.u
7	Barra 30	1.0475 p.u	1.0000 p.u
7	Barra 37	1.0278 p.u	1.0124 p.u
7	Barra 38	1.0265 p.u	1.0148 p.u

En la Tabla 3.6 se puede observar que en ciertas áreas al tener una demanda máxima los niveles de voltaje están por debajo del 0.95 p.u, pero al ser incorporados los nodos pilotos y las áreas dinámicas los niveles de voltaje toman nuevamente los valores que están dentro de los rangos permitidos. En la Figura 3.7 se muestra el diagrama de los niveles de voltajes en todas las barras del sistema a demanda máxima con la incorporación de los nodos pilotos.

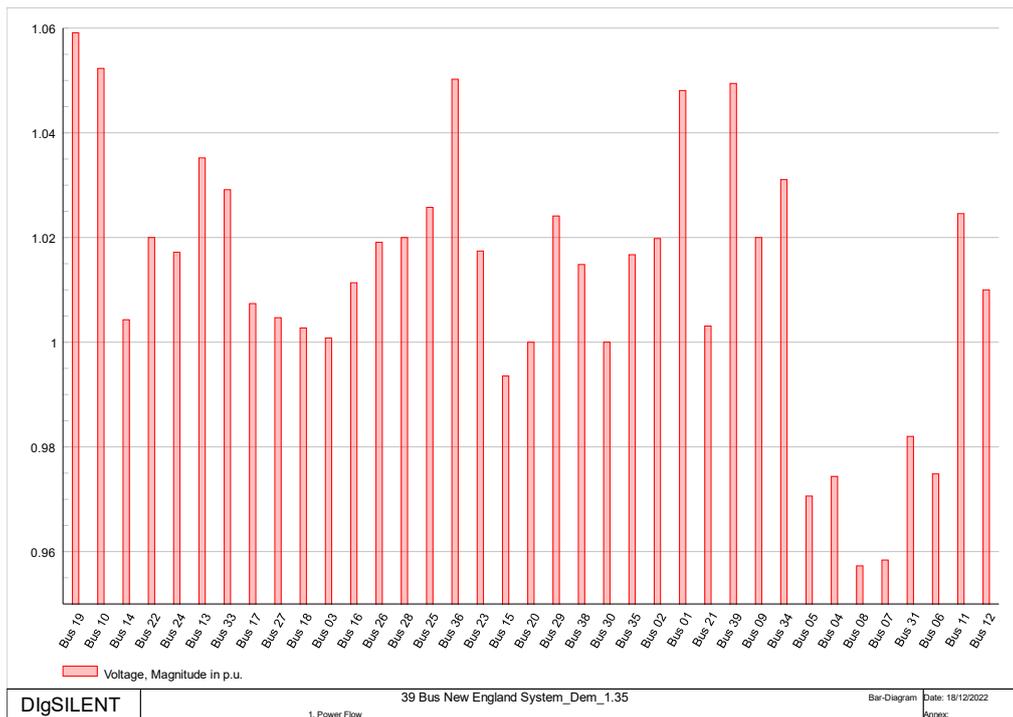


Figura 3.7. Niveles de voltaje a demanda máxima.

En la Figura 3.8 se muestra los resultados que se obtuvo al realizar simulaciones de cortocircuito en cada una de las 7 áreas del sistema antes de la incorporación de los nodos pilotos (curvas en color rojo) y luego de su incorporación (curvas en color azul)

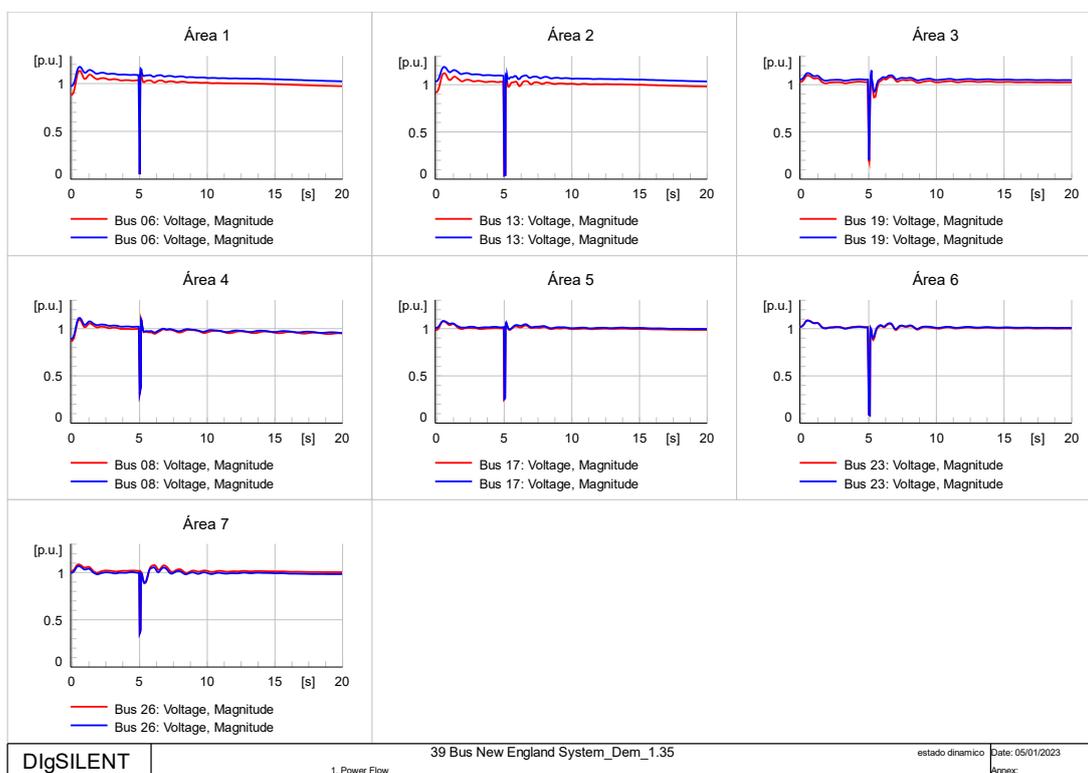


Figura 3.8. respuesta dinámica del sistema a demanda máxima.

3.1.1.3 Demanda mínima

Para el estudio en demanda mínima a las cargas se les multiplico por un factor de 0.5 con lo cual se obtuvo la división de áreas que se muestra en la Tabla 3.7 mediante el programa Phyton.

Tabla 3.7. División de áreas dinámica a demanda mínima

Área	Nodo piloto	Barras
1	4	31-6-5-4
2	12	32-13-12-11-10
3	20	33-24-20-19-16-15
4	9	39-9-8-7
5	14	14
6	29	38-37-34-30-29-28-27-26-25-18-17-3-2-1
7	21	36-35-23-22-21

En la Tabla 3.7 se puede observar que el área numero 5 solo dispone de una barra de control por lo cual se redefino y se le ubico en un área adyacente (al área dinámica 3) obtenido 6 áreas de control como se muestra en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Resultados de la reubicación de áreas

Área	Nodo piloto	Barras
1	4	31-6-5-4
2	12	32-13-12-11-10
3	20	33-24-20-19-16-15-14
4	9	39-9-8-7
5	29	38-37-34-30-29-28-27-26-25-18-17-3-2-1
6	21	36-35-23-22-21

La división de áreas con los respectivos nodos pilotos ya implementado en PowerFactory se muestra en la Figura 3.9

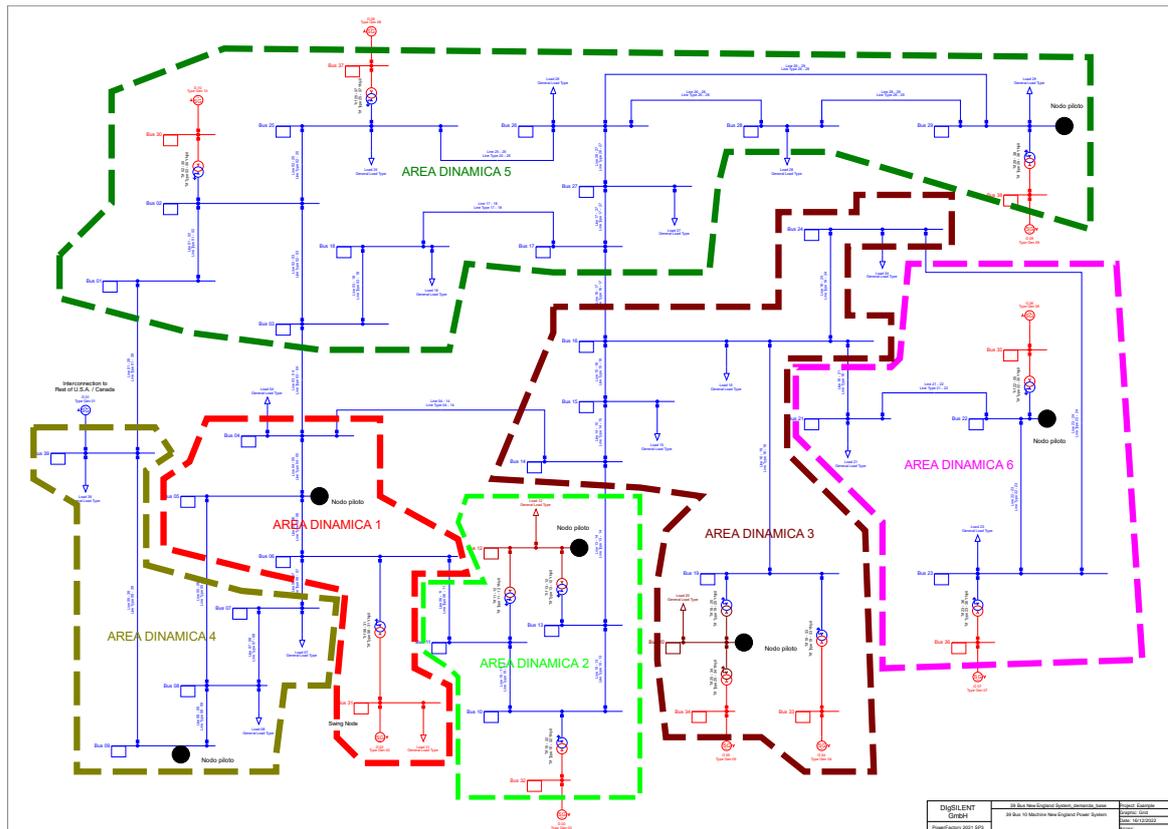


Figura 3.9. Ubicación de áreas dinámicas y nodos pilotos a demanda mínima.

En la Tabla 3.9 se muestra los niveles de voltaje antes de la incorporación de las áreas dinámicas y nodos pilotos y luego de su incorporación.

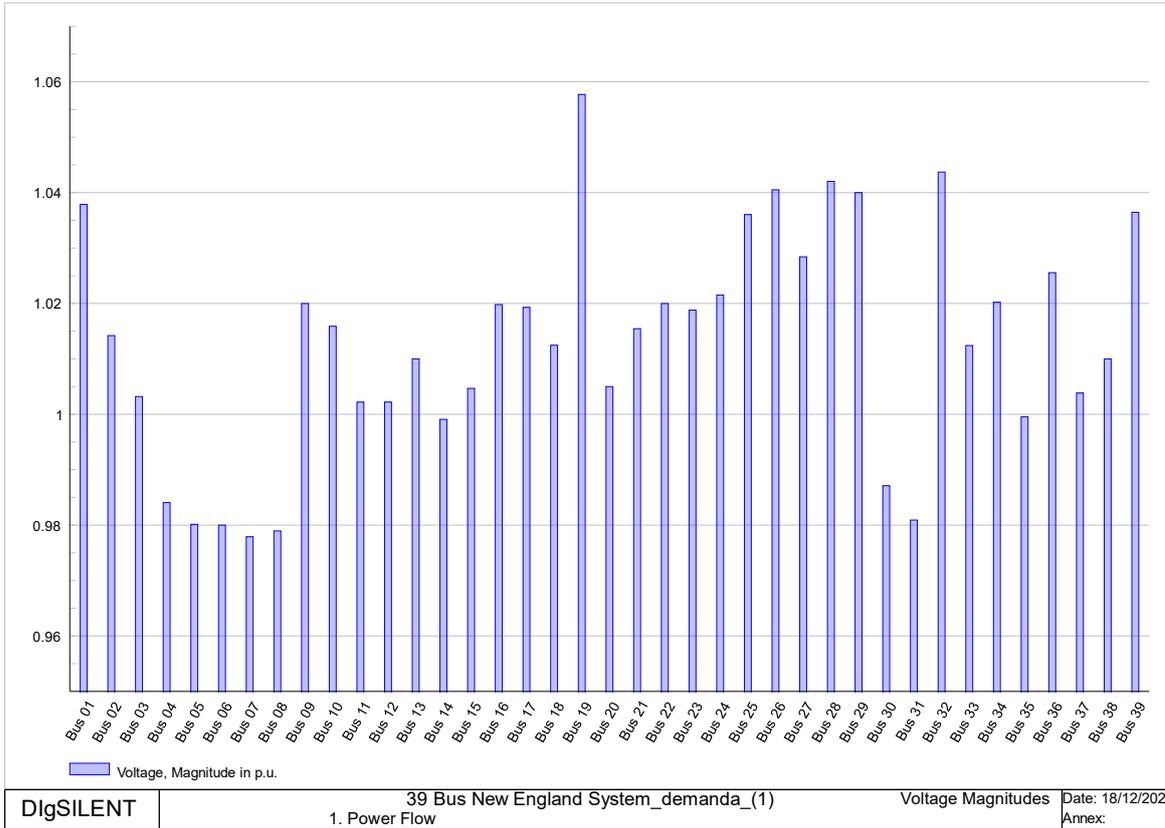
Tabla 3.9. Resultados de los niveles de voltaje a demanda mínima

Área	Barra	Voltaje previo al control de voltaje	Voltaje luego del control de voltaje
1	Barra 4	0.9802 p.u	0.9841 p.u
1	Barra 5	0.9691 p.u	0.9802 p.u
1	Barra 6	0.9676 p.u	0.9800 p.u
1	Barra 31	0.9820 p.u	0.9809 p.u
2	Barra 10	0.9920 p.u	1.0159 p.u
2	Barra 11	0.9822 p.u	1.0022 p.u
2	Barra 12	0.9822 p.u	1.0022 p.u
2	Barra 13	0.9907 p.u	1.0100 p.u
2	Barra 32	0.9800 p.u	1.0437 p.u
3	Barra 15	1.0118 p.u	1.0047 p.u
3	Barra 16	1.0333 p.u	1.0198 p.u
3	Barra 19	1.0537 p.u	1.0577 p.u
3	Barra 20	0.9994 p.u	1.0050 p.u
3	Barra 24	1.0380 p.u	1.0215 p.u
3	Barra 33	0.9972 p.u	1.0124 p.u

4	Barra 7	0.9662 p.u	0.9779 p.u
4	Barra 8	0.9676 p.u	0.9790 p.u
4	Barra 9	1.0114 p.u	1.0200 p.u
4	Barra 39	1.0300 p.u	1.0364 p.u
5	Barra 1	1.0454 p.u	1.0379 p.u
5	Barra 2	1.0440 p.u	1.0142 p.u
5	Barra 3	1.0192 p.u	1.0032 p.u
5	Barra 17	1.0348 p.u	1.0193 p.u
5	Barra 18	1.0282 p.u	1.0125 p.u
5	Barra 25	1.0631 p.u	1.0360 p.u
5	Barra 26	1.0616 p.u	1.0405 p.u
5	Barra 27	1.0471 p.u	1.0284 p.u
5	Barra 28	1.0617 p.u	1.0420 p.u
5	Barra 29	1.0589 p.u	1.0400 p.u
5	Barra 30	1.0475 p.u	0.9871 p.u
5	Barra 34	1.0123 p.u	1.0202 p.u
5	Barra 37	1.0278 p.u	1.0038 p.u
5	Barra 38	1.0265 p.u	1.0100 p.u
6	Barra 21	1.0403 p.u	1.0154 p.u
6	Barra 22	1.0559 p.u	1.0200 p.u
6	Barra 23	1.0522 p.u	1.0188 p.u
6	Barra 35	1.0493 p.u	0.9995 p.u
6	Barra 36	1.0635 p.u	1.0256 p.u

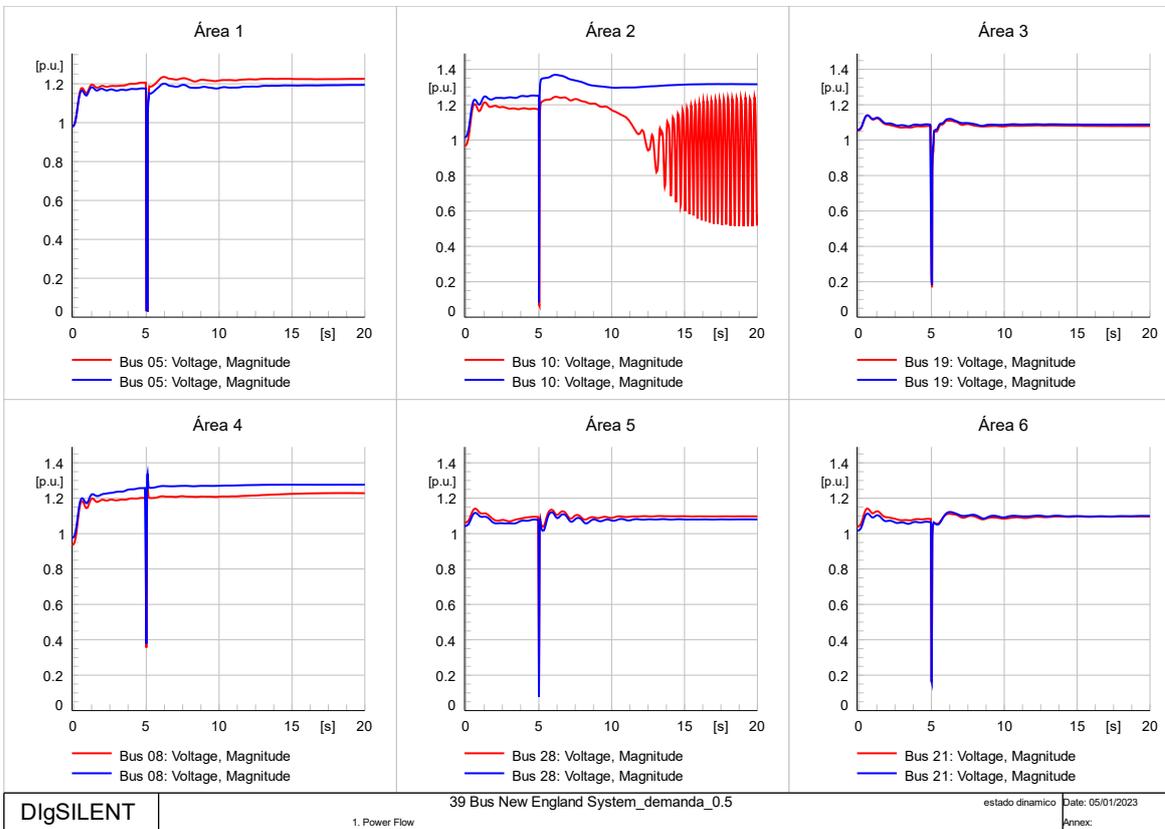
En la Tabla 3.9 se puede observar que el sistema al estar operando a demanda mínima los voltajes en las barras se incrementan, pero luego de incorporar las áreas dinámicas y los nodos pilotos los niveles de voltaje se mantienen en los rangos permitidos (0.95 p.u a 1.05 p.u). En la Figura 3.10 se muestra los niveles de voltaje en todas las barras del sistema luego de incluir los nodos pilotos y las áreas dinámicas.

En la Figura 3.11 se muestra los resultados al realizar simulaciones de cortocircuitos trifásicos en cada área del sistema sin la incorporación de los nodos pilotos (curvas de color rojo) y luego de la incorporación de los nodos pilotos (curvas en color azul)



DigSILENT | 39 Bus New England System_demanda_(1) | Voltage Magnitudes | Date: 18/12/2022
 1. Power Flow | Annex:

Figura 3.10. Niveles de voltaje en el sistema a demanda mínima



DigSILENT | 39 Bus New England System_demanda_0.5 | estado dinámico | Date: 05/01/2023
 1. Power Flow | Annex:

Figura 3.11. Respuesta dinámica del sistema ante cortocircuitos

3.1.2 FLUJO EXTENDIDO DE POTENCIA

3.1.2.1 Demanda base

Para esta demanda se utilizó la división de áreas que se muestra en la figura 3.1 proporcionada por la metodología de la matriz jacobina reducida, en la tabla 3.10 se muestra el nodo piloto de cada área y la variación de voltaje de ese nodo una vez que se aplicó la ecuación 2.8, en el Anexo 3 se muestra las tablas que se realizaron para poder llegar a cada nodo piloto

Tabla 3.10. Resultados de la elección de nodos a demanda base

Área	Nodo piloto	Variación de voltaje
1	Bus 4	0.002314
2	Bus 10	0.000812
3	Bus 19	0.000126
4	Bus 9	0.000106
5	Bus 2	0.0000967
6	Bus 21	0.000267

Una vez incorporado las áreas dinámicas y los nodos piloto mediante un flujo de potencia convencional en la tabla 3.11 se muestra los niveles de voltaje que se obtuvieron antes de aplicar la metodología y luego de su aplicación.

Tabla 3.11. niveles de voltaje a demanda base a demanda base

Área	Barra	Voltaje previo al control de voltaje	Voltaje luego del control de voltaje
1	Barra 4	0.8604 p.u	1.0167 p.u
1	Barra 5	0.8184 p.u	1.0336 p.u
1	Barra 6	0.8192 p.u	1.03999 p.u
1	Barra 31	0.7951 p.u	1.0156 p.u
2	Barra 10	0.8828 p.u	1.0399 p.u
2	Barra 11	0.8578 p.u	1.0368 p.u
2	Barra 12	0.8112 p.u	0.990167 p.u
2	Barra 13	0.8760p.u	1.036831 p.u
2	Barra 32	0.9831p.u	1.0301 p.u
3	Barra 15	0.9299p.u	1.0076 p.u
3	Barra 16	0.9711p.u	1.0185 p.u
3	Barra 19	1.0275p.u	1.0399 p.u
3	Barra 20	0.9790 p.u	0.9770 p.u
3	Barra 24	0.9813p.u	1.02453 p.u
3	Barra 33	0.9972p.u	0.99574 p.u
4	Barra 7	0.7951p.u	1.02632 p.u
4	Barra 8	0.7916p.u	1.02376 p.u
4	Barra 9	0.9435p.u	1.03999 p.u
4	Barra 39	1.0299p.u	1.03126 p.u

5	Barra 1	1.0367 p.u	1.045981 p.u
5	Barra 2	1.0191 p.u	1.03999 p.u
5	Barra 3	0.9561 p.u	1.0259 p.u
5	Barra 17	0.9702 p.u	1.0201 p.u
5	Barra 18	0.9592 p.u	1.01722 p.u
5	Barra 25	1.0289 p.u	1.0469 p.u
5	Barra 26	1.0145 p.u	1.0410 p.u
5	Barra 27	0.9871 p.u	1.02489 p.u
5	Barra 28	1.0306 p.u	1.04444 p.u
5	Barra 29	1.0366 p.u	1.046029 p.u
5	Barra 30	1.0475 p.u	1.0188 p.u
5	Barra 34	1.0123 p.u	0.992635 p.u
5	Barra 37	1.0278 p.u	1.031426 p.u
5	Barra 38	1.0265 p.u	1.02649 p.u
6	Barra 21	0.9881 p.u	1.0199 p.u
6	Barra 22	1.0224 p.u	1.03745 p.u
6	Barra 23	1.0101 p.u	1.029109 p.u
6	Barra 35	1.0493 p.u	1.0403 p.u
6	Barra 36	1.0635 p.u	1.0730 p.u

En la tabla 3.11 se puede observar que los niveles de voltaje mejoran a cuando se tiene incorporado las áreas dinámicas y los nodos piloto, en la figura 3.12 se muestran los niveles de voltaje del sistema con la incorporación de los nodos pilotos.

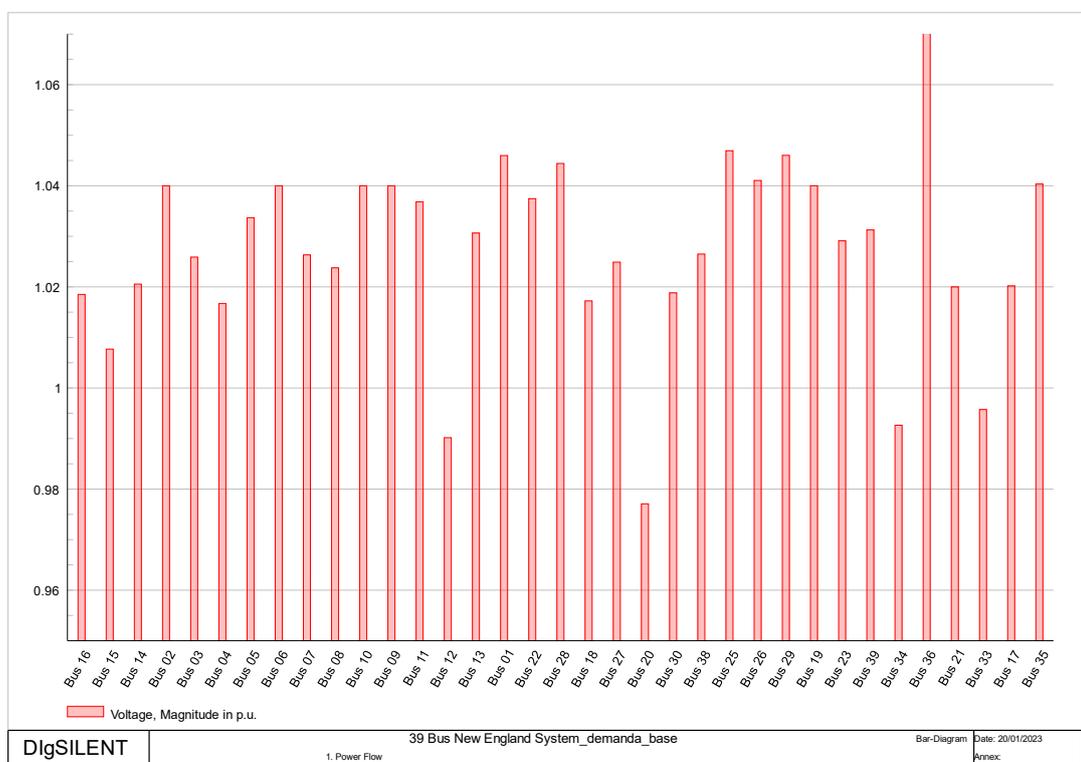


Figura 3.12. Niveles de voltaje a demanda base.

En la figura 3.13 se muestra la respuesta del sistema ante perturbaciones de cortocircuito trifásicos en cada área antes y después de la incorporación de los nodos pilotos

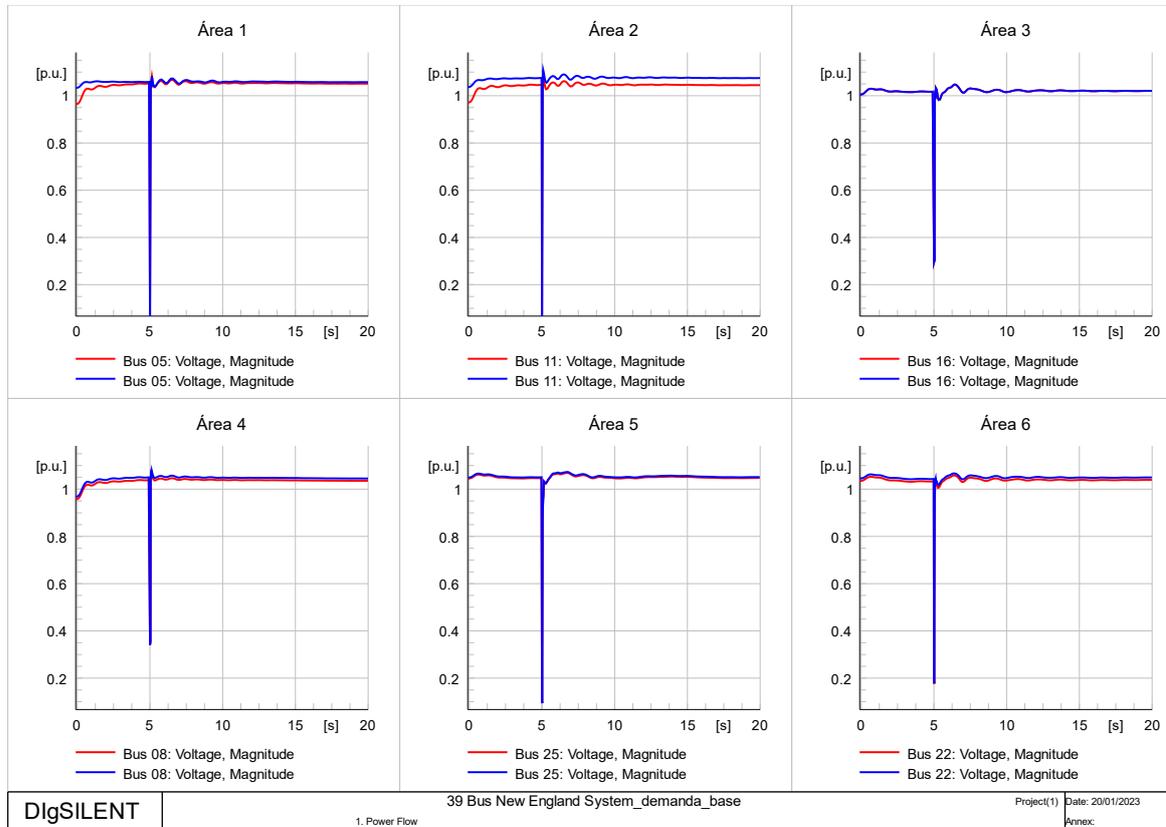


Figura 3.13. respuesta dinámica del sistema a demanda base.

3.1.2.2 Demanda máxima

Para este punto de operación se utiliza la división de áreas dinámicas que se muestra en la figura 3.6, en la tabla 3.12 se muestra el nodo piloto de cada área y la variación de voltaje de ese nodo una vez que se aplicó la ecuación 2.8.

Tabla 3.12. Resultados de la elección de nodos a demanda maxima

Área	Nodo piloto	Variación de voltaje
1	Bus 6	0.00346
2	Bus 13	0.00219
3	Bus 16	0.000002
4	Bus 9	0.00286
5	Bus 17	0.000075
6	Bus 23	0.0014
7	Bus 26	0.00135

Una vez incorporado las áreas dinámicas y los nodos piloto, mediante un flujo de potencia convencional, en la tabla 3.13 se muestra los niveles de voltaje que se obtuvieron antes de aplicar la metodología y luego de su aplicación

Tabla 3.13. Resultados de voltajes a demanda máxima

Área	Barra	Voltaje previo al control de voltaje	Voltaje luego del control de voltaje
1	Barra 5	0.8778 p.u	0.897815 p.u
1	Barra 6	0.8798 p.u	0.900746 p.u
1	Barra 31	0.9820 p.u	1.0099 p.u
2	Barra 10	0.9251 p.u	0.9386 p.u
2	Barra 11	0.9081 p.u	0.924193 p.u
2	Barra12	0.8890 p.u	0.9044 p.u
2	Barra 13	0.9182 p.u	0.931779 p.u
2	Barra 32	0.9831 p.u	0.9832 p.u
3	Barra 15	0.9462 p.u	0.9536 p.u
3	Barra 16	0.9847 p.u	0.9894 p.u
3	Barra 19	1.0298 p.u	1.0316 p.u
3	Barra 20	0.9756 p.u	0.9765 p.u
3	Barra 24	0.9951 p.u	0.999414 p.u
3	Barra 33	0.9972 p.u	0.9972 p.u
4	Barra 7	0.8653 p.u	0.8854 p.u
4	Barra 8	0.8664 p.u	0.8858 p.u
4	Barra 9	0.9701 p.u	0.9782 p.u
5	Barra 17	0.9837 p.u	0.9887 p.u
5	Barra 18	0.9769 p.u	0.9828 p.u
5	Barra 27	0.9915 p.u	0.9954 p.u
5	Barra 34	1.0123 p.u	1.0123 p.u
6	Barra 21	0.9935 p.u	0.9968 p.u
6	Barra 22	1.0283 p.u	1.03014 p.u
6	Barra 23	1.0218 p.u	1.02368 p.u
6	Barra 35	1.0493 p.u	1.0493 p.u
6	Barra 36	1.0635 p.u	1.0635 p.u
7	Barra 1	1.0373 p.u	1.038 p.u
7	Barra 2	1.0237 p.u	1.026 p.u
7	Barra 3	0.9718 p.u	0.9789 p.u
7	Barra 4	0.8948 p.u	0.9096 p.u
7	Barra 14	0.9137 p.u	0.9266 p.u
7	Barra 25	1.0310 p.u	1.0335 p.u
7	Barra 26	1.0152 p.u	1.0180 p.u
7	Barra 28	1.0244 p.u	1.0259 p.u
7	Barra 29	1.0310 p.u	1.0320 p.u
7	Barra 30	1.0475 p.u	1.0475 p.u
7	Barra 37	1.0278 p.u	1.0278 p.u
7	Barra 38	1.0265 p.u	1.0265 p.u

En la tabla 3.12 se puede observar que los niveles de voltaje que mejoran, pero no se logra llegar a los niveles que están dentro de las bandas de operación, en la figura 3.14 se muestra los niveles de voltaje a demanda máxima

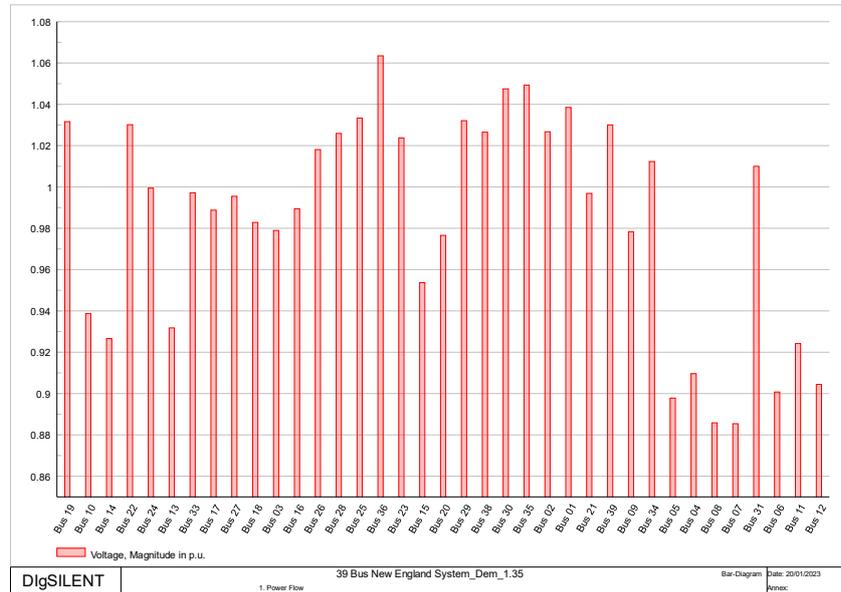


Figura 3.14. Niveles de voltaje a demanda máxima

En la figura 3.15 se muestra la respuesta del sistema ante perturbaciones de cortocircuitos trifásicos producidas en cada área antes de la incorporación de los nodos pilotos y luego de su incorporación.

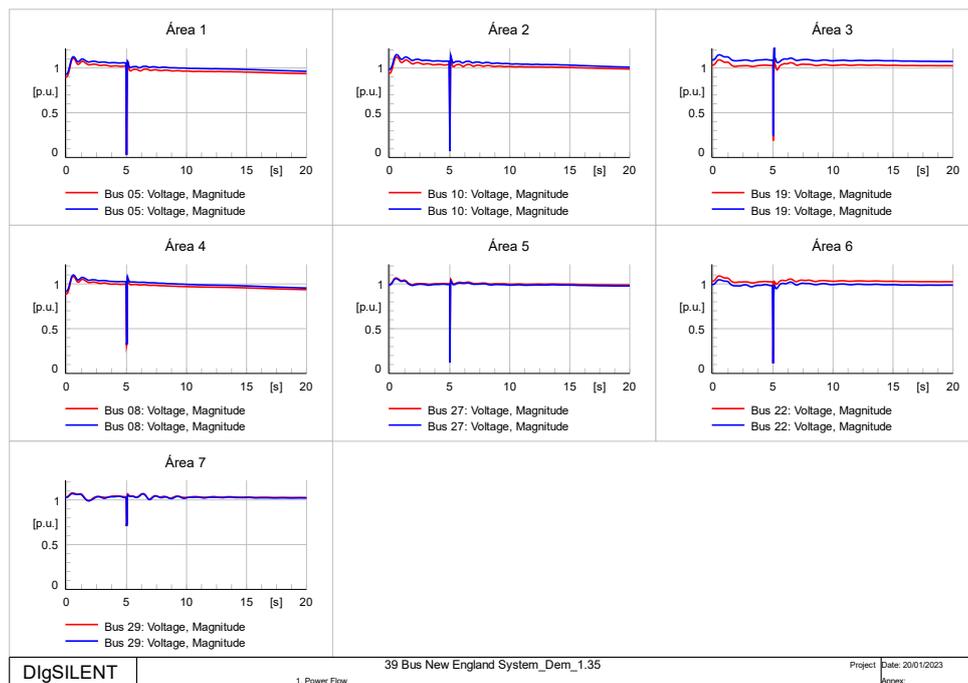


Figura 3.15. respuesta dinámica del sistema a demanda máxima.

3.1.2.3 Demanda mínima

Para este punto de operación se utiliza la división de áreas dinámicas que se muestra en la figura 3.9, en la tabla 3.14 se muestra el nodo piloto de cada área y la variación de voltaje de ese nodo una vez que se aplicó la ecuación 2.8.

Tabla 3.14. nodos piloto

Área	Nodo piloto	Variación de voltaje
1	Bus 4	0.0000005
2	Bus 10	0.00047
3	Bus 15	0.0003638
4	Bus 9	0.00000607
5	Bus 29	0.0008707
6	Bus 21	0.0006998

En la Tabla 3.15 se muestra los niveles de voltaje que se obtuvieron antes de la incorporación de los nodos pilotos y luego de la incorporación.

Tabla 3.15. Resultados de los niveles de voltaje

Área	Barra	Voltaje previo al control de voltaje	Voltaje luego del control de voltaje
1	Barra 4	0.9802 p.u	0.990 p.u
1	Barra 5	0.9691 p.u	0.9921 p.u
1	Barra 6	0.9676 p.u	0.9934 p.u
1	Barra 31	0.9820 p.u	1.036 p.u
2	Barra 10	0.9920 p.u	1.0147 p.u
2	Barra 11	0.9822 p.u	1.0059 p.u
2	Barra 12	0.9822 p.u	1.0041 p.u
2	Barra 13	0.9907 p.u	1.0099 p.u
2	Barra 32	0.9800 p.u	1.0130 p.u
3	Barra 15	1.0118 p.u	1.0049 p.u
3	Barra 16	1.0333 p.u	1.0193 p.u
3	Barra 19	1.0537 p.u	1.04210 p.u
3	Barra 20	0.9994 p.u	0.9852 p.u
3	Barra 24	1.0380 p.u	1.0225 p.u
3	Barra 33	0.9972 p.u	0.9916 p.u
4	Barra 7	0.9662 p.u	0.9897 p.u
4	Barra 8	0.9676 p.u	0.9899 p.u
4	Barra 9	1.0114 p.u	1.0199 p.u
4	Barra 39	1.0300 p.u	1.0289 p.u
5	Barra 1	1.0454 p.u	1.0331 p.u
5	Barra 2	1.0440 p.u	1.0142 p.u
5	Barra 3	1.0192 p.u	1.0051 p.u
5	Barra 17	1.0348 p.u	1.01945 p.u

5	Barra 18	1.0282 p.u	1.0132 p.u
5	Barra 25	1.0631 p.u	1.0360 p.u
5	Barra 26	1.0616 p.u	1.0405 p.u
5	Barra 27	1.0471 p.u	1.0285 p.u
5	Barra 28	1.0617 p.u	1.0420 p.u
5	Barra 29	1.0589 p.u	1.0399 p.u
5	Barra 30	1.0475 p.u	0.9871 p.u
5	Barra 34	1.0123 p.u	0.9944 p.u
5	Barra 37	1.0278 p.u	1.0038 p.u
5	Barra 38	1.0265 p.u	1.0099 p.u
6	Barra 21	1.0403 p.u	1.0199 p.u
6	Barra 22	1.0559 p.u	1.0296 p.u
6	Barra 23	1.0522 p.u	1.0287 p.u
6	Barra 35	1.0493 p.u	1.0135 p.u
6	Barra 36	1.0635 p.u	1.0429 p.u

En la figura 3.16 se muestra los niveles de voltaje a demanda mínima en la cual se puede observar que el sistema tiene una buena respuesta ya que los voltajes que estaban sobre la banda de operación se establecieron dentro de ella luego de la incorporación de los nodos pilotos.

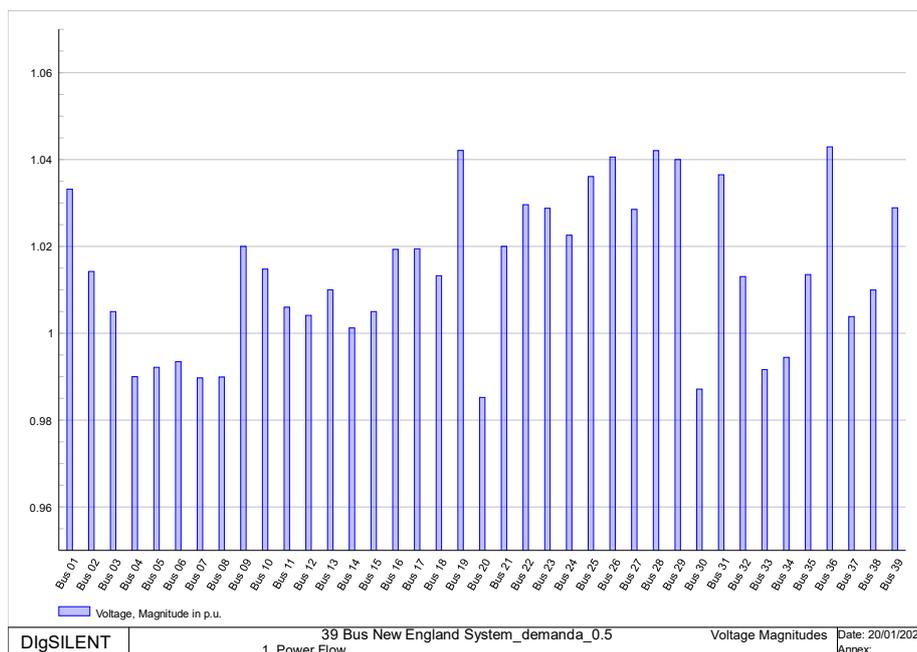


Figura 3.16. Niveles de voltaje del sistema a demanda mínima.

En la figura 3.17 se muestra la respuesta del sistema ante perturbaciones de cortocircuito trifásicos en cada área antes de la incorporación de los nodos pilotos y luego de su incorporación.

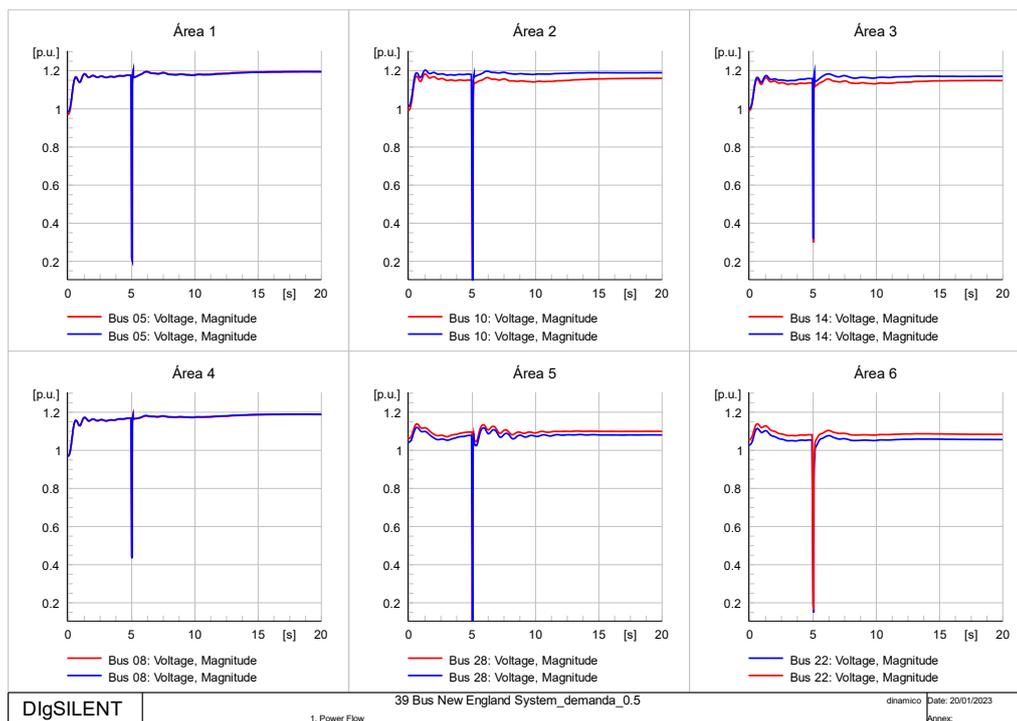


Figura 3.17. Respuesta dinámica del sistema a demanda mínima.

3.1.3 MODELO HIBRIDO

Se analizará las dos metodologías que se desarrolló, el flujo extendido de potencia y la matriz jacobiana reducida a las tres demandas, demanda base, máxima y mínima, en donde se analizara los resultados de voltaje que se obtuvieron con lo cual se pueda unir las dos metodologías para un mismo punto de operación, con lo cual se esperara tener mejores resultados a cuando solo se aplicó una metodología.

3.1.3.1 Demanda base

En la tabla 3.16 se muestra los nodos pilotos para las dos metodologías propuestas

Tabla 3.16. Ubicación de los dos nodos pilotos por las dos metodologías

Área	Nodo piloto MJR	Nodo piloto FEP
1	Bus 4	Bus 4
2	Bus 12	Bus 10
3	Bus 20	Bus 19
4	Bus 9	Bus 9
5	Bus 29	Bus 2
6	Bus 21	Bus 21

En la tabla 3.17 se muestra los niveles de voltaje que se obtuvieron al aplicar las dos metodologías a demanda base.

Tabla 3.17. Niveles de voltaje con las dos metodologías

Área	Barra	Voltaje previo al control de voltaje	Voltaje con el método del MJR	Voltaje con el método FEP
1	Barra 4	0.8604 p.u	0.9895 p.u	1.0167 p.u
1	Barra 5	0.8184 p.u	1 p.u	1.0336 p.u
1	Barra 6	0.8192 p.u	1.0100 p.u	1.03999 p.u
1	Barra 31	0.7951 p.u	0.9812 p.u	1.0156 p.u
2	Barra 10	0.8828 p.u	1.0205p.u	1.0399 p.u
2	Barra 11	0.8578 p.u	1.0138p.u	1.0368 p.u
2	Barra 12	0.8112 p.u	0.9669p.u	0.99016 p.u
2	Barra 13	0.8760p.u	1.0099 p.u	1.03683 p.u
2	Barra 32	0.9831p.u	1.0364p.u	1.0301 p.u
3	Barra 15	0.9299p.u	0.9909p.u	1.0076 p.u
3	Barra 16	0.9711p.u	1.0049p.u	1.0185 p.u
3	Barra 19	1.0275p.u	1.0457p.u	1.0399 p.u
3	Barra 20	0.9790 p.u	0.9889p.u	0.9770 p.u
3	Barra 24	0.9813p.u	1.0104p.u	1.02453 p.u
3	Barra 33	0.9972p.u	1.0090p.u	0.99574 p.u
4	Barra 7	0.7951p.u	0.9812p.u	1.02632 p.u
4	Barra 8	0.7916p.u	0.9725p.u	1.02376 p.u
4	Barra 9	0.9435p.u	1.0199p.u	1.03999 p.u
4	Barra 39	1.0299p.u	1.0328p.u	1.03126 p.u
5	Barra 1	1.0367 p.u	1.0369 p.u	1.04598 p.u
5	Barra 2	1.0191 p.u	1.0148 p.u	1.03999 p.u
5	Barra 3	0.9561 p.u	1.0023 p.u	1.0259 p.u
5	Barra 17	0.9702 p.u	1.0035 p.u	1.0201 p.u
5	Barra 18	0.9592 p.u	0.9978 p.u	1.01722 p.u
5	Barra 25	1.0289 p.u	1.0200 p.u	1.0469 p.u
5	Barra 26	1.0145 p.u	1.0241 p.u	1.0410 p.u
5	Barra 27	0.9871 p.u	1.0079 p.u	1.02489 p.u
5	Barra 28	1.0306 p.u	1.0356 p.u	1.04444 p.u
5	Barra 29	1.0366 p.u	1.0400 p.u	1.04602 p.u
5	Barra 30	1.0475 p.u	0.9899 p.u	1.0188 p.u
5	Barra 34	1.0123 p.u	1.0125 p.u	0.99263 p.u
5	Barra 37	1.0278 p.u	0.9929 p.u	1.03142 p.u
5	Barra 38	1.0265 p.u	1.0265 p.u	1.02649 p.u
6	Barra 21	0.9881 p.u	1.0043 p.u	1.0199 p.u
6	Barra 22	1.0224 p.u	1.0200 p.u	1.03745 p.u
6	Barra 23	1.0101 p.u	1.0113 p.u	1.02910 p.u
6	Barra 35	1.0493 p.u	1.0222 p.u	1.0403 p.u
6	Barra 36	1.0635 p.u	1.0534 p.u	1.0730 p.u

En la tabla 17 se puede observar que el área 1, área 2, área 3 y área 4 los niveles de voltaje son mejores a cuando se aplica el método de flujo extendido de potencia, en cambio en la área 5 y 6 los niveles de voltaje son mejores aplicando la metodología del flujo

extendido de potencia, cabe mencionar que en las dos metodologías cumplen con lo requerido, de mantener los niveles de voltaje dentro de las bandas de operación, en la figura 3.18 se muestra la respuesta dinámica del sistema, utilizando el nodo piloto de la metodología de la matriz jacobiana reducida en la metodología del flujo extendido de potencia cumpliendo con la metodología híbrida.

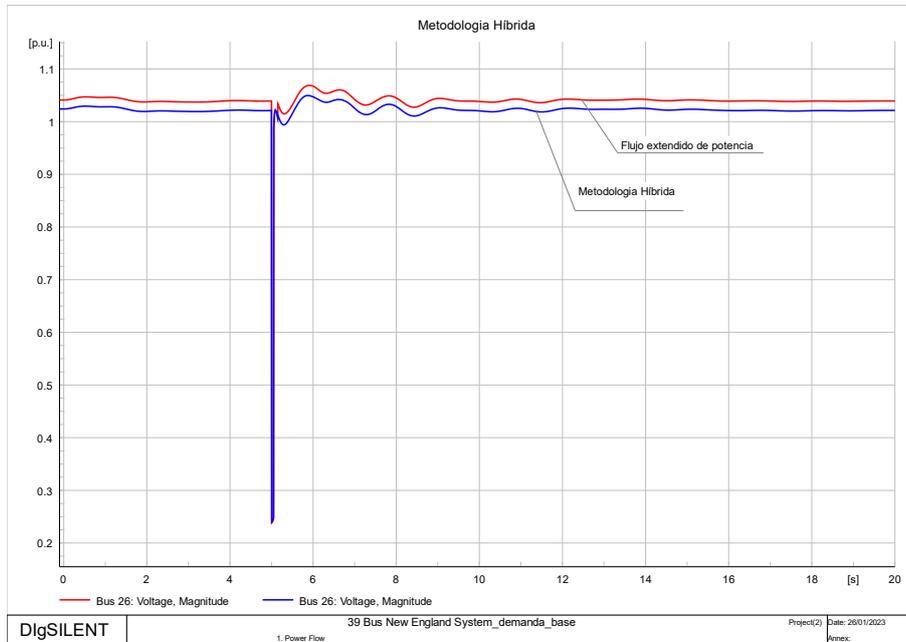


Figura 3.18. Respuesta dinámica del sistema con la metodología híbrida a demanda base.

3.1.3.2 Demanda máxima

En la tabla 3.18 se muestra los nodos pilotos para las dos metodologías propuestas.

Tabla 3.18. Ubicación de los dos nodos pilotos por las dos metodologías

Área	Nodo piloto MJR	Nodo piloto FEP
1	Bus 5	Bus 6
2	Bus 12	Bus 13
3	Bus 20	Bus 16
4	Bus 9	Bus 9
5	Bus 27	Bus 17
6	Bus 21	Bus 23
7	Bus 28	Bus 26

En la tabla 3.19 se muestra los niveles de voltaje que se obtuvieron al aplicar las dos metodologías a demanda máxima.

Tabla 3.19. Niveles de voltaje con las dos metodologías a demanda maxima

Área	Barra	Voltaje previo al control de voltaje	Voltaje con el método del MJR	Voltaje con el método FEP
1	Barra 5	0.8778 p.u	0.9706 p.u	0.897815 p.u
1	Barra 6	0.8798 p.u	0.9749 p.u	0.900746 p.u
1	Barra 31	0.9820 p.u	0.9820 p.u	1.0099 p.u
2	Barra 10	0.9251 p.u	1.0523 p.u	0.9386 p.u
2	Barra 11	0.9081 p.u	1.0246 p.u	0.924193 p.u
2	Barra12	0.8890 p.u	1.0100 p.u	0.9044 p.u
2	Barra 13	0.9182 p.u	1.0352 p.u	0.931779 p.u
2	Barra 32	0.9831 p.u	1.02020 p.u	0.9832 p.u
3	Barra 15	0.9462 p.u	0.9935 p.u	0.9536 p.u
3	Barra 16	0.9847 p.u	1.0114 p.u	0.9894 p.u
3	Barra 19	1.0298 p.u	1.0591 p.u	1.0316 p.u
3	Barra 20	0.9756 p.u	1.0000 p.u	0.9765 p.u
3	Barra 24	0.9951 p.u	1.0172 p.u	0.999414 p.u
3	Barra 33	0.9972 p.u	1.0291 p.u	0.9972 p.u
4	Barra 7	0.8653 p.u	0.9584 p.u	0.8854 p.u
4	Barra 8	0.8664 p.u	0.9573 p.u	0.8858 p.u
4	Barra 9	0.9701 p.u	1.0200 p.u	0.9782 p.u
5	Barra 17	0.9837 p.u	1.0074 p.u	0.9887 p.u
5	Barra 18	0.9769 p.u	1.0027 p.u	0.9828 p.u
5	Barra 27	0.9915 p.u	1.0047 p.u	0.9954 p.u
5	Barra 34	1.0123 p.u	1.0311 p.u	1.0123 p.u
6	Barra 21	0.9935 p.u	1.0031 p.u	0.9968 p.u
6	Barra 22	1.0283 p.u	1.0200 p.u	1.03014 p.u
6	Barra 23	1.0218 p.u	1.0174 p.u	1.02368 p.u
6	Barra 35	1.0493 p.u	1.0167 p.u	1.0493 p.u
6	Barra 36	1.0635 p.u	1.0502 p.u	1.0635 p.u
7	Barra 1	1.0373 p.u	1.0481 p.u	1.038 p.u
7	Barra 2	1.0237 p.u	1.0198 p.u	1.026 p.u
7	Barra 3	0.9718 p.u	1.0008 p.u	0.9789 p.u
7	Barra 4	0.8948 p.u	0.9744 p.u	0.9096 p.u
7	Barra 14	0.9137 p.u	1.0043 p.u	0.9266 p.u
7	Barra 25	1.0310 p.u	1.0258 p.u	1.0335 p.u
7	Barra 26	1.0152 p.u	1.0191 p.u	1.0180 p.u
7	Barra 28	1.0244 p.u	1.0200 p.u	1.0259 p.u
7	Barra 29	1.0310 p.u	1.0241 p.u	1.0320 p.u
7	Barra 30	1.0475 p.u	1.0000 p.u	1.0475 p.u
7	Barra 37	1.0278 p.u	1.0124 p.u	1.0278 p.u
7	Barra 38	1.0265 p.u	1.0148 p.u	1.0265 p.u

En la tabla 3.19 se puede observar que los niveles de voltaje en el área 1, área 2, área 3 y área 4 utilizando la metodología del flujo extendido de potencia no se logra llegar a los niveles de voltaje que estén dentro de las bandas de operación, pero al utilizar la

metodología de la matriz jacobiana reducida en todas las áreas se logra tener niveles de voltaje dentro de las bandas de operación, para la metodología habría se utiliza los nodos pilotos del área 5, área 6 y área 7 de la metodología del flujo extendido de potencia en la metodología de la matriz jacobiana reducida en la figura 3.19 se muestra la respuesta dinámica del modelo híbrido.

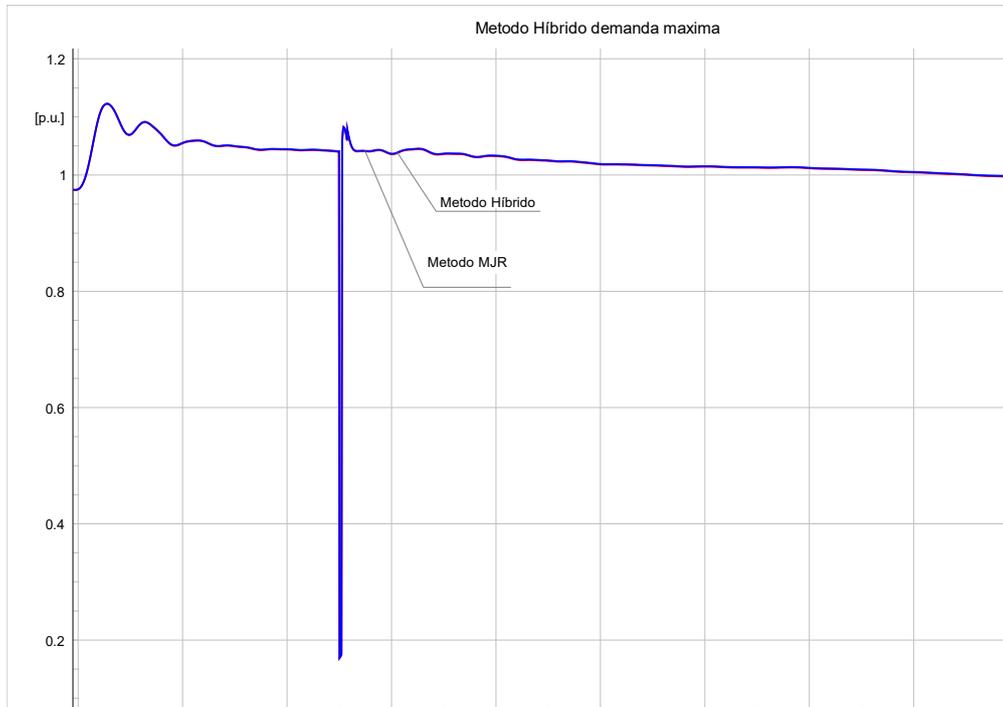


Figura 3.19. Respuesta dinámica del sistema con la metodología híbrida a demanda máxima.

3.1.3.3 Demanda mínima

En la tabla 3.19 se muestra los nodos pilotos para las dos metodologías propuestas.

Tabla 3.19. Ubicación de los dos nodos pilotos por las dos metodologías a demanda mínima

Área	Nodo piloto MJR	Nodo piloto FEP
1	Bus 4	Bus 4
2	Bus 12	Bus 10
3	Bus 20	Bus 15
4	Bus 9	Bus 9
5	Bus 29	Bus 29
6	Bus 21	Bus 21

En la tabla 3.20 se muestra los niveles de voltaje que se obtuvieron al aplicar las dos metodologías a demanda mínima.

Tabla 3.20. Niveles de voltaje con las dos metodologías a demanda mínima

Área	Barra	Voltaje previo al control de voltaje	Voltaje con el método del MJR	Voltaje con el método FEP
1	Barra 4	0.9802 p.u	0.9841 p.u	0.990
1	Barra 5	0.9691 p.u	0.9802 p.u	0.9921
1	Barra 6	0.9676 p.u	0.9800 p.u	0.9934
1	Barra 31	0.9820 p.u	0.9809 p.u	1.036
2	Barra 10	0.9920 p.u	1.0159 p.u	1.0147
2	Barra 11	0.9822 p.u	1.0022 p.u	1.0059
2	Barra 12	0.9822 p.u	1.0022 p.u	1.0041
2	Barra 13	0.9907 p.u	1.0100 p.u	1.0099
2	Barra 32	0.9800 p.u	1.0437 p.u	1.0130
3	Barra 15	1.0118 p.u	1.0047 p.u	1.0049
3	Barra 16	1.0333 p.u	1.0198 p.u	1.0193
3	Barra 19	1.0537 p.u	1.0577 p.u	1.04210
3	Barra 20	0.9994 p.u	1.0050 p.u	0.9852
3	Barra 24	1.0380 p.u	1.0215 p.u	1.0225
3	Barra 33	0.9972 p.u	1.0124 p.u	0.9916
4	Barra 7	0.9662 p.u	0.9779 p.u	0.9897
4	Barra 8	0.9676 p.u	0.9790 p.u	0.9899
4	Barra 9	1.0114 p.u	1.0200 p.u	1.0199
4	Barra 39	1.0300 p.u	1.0364 p.u	1.0289
5	Barra 1	1.0454 p.u	1.0379 p.u	1.0331
5	Barra 2	1.0440 p.u	1.0142 p.u	1.0142
5	Barra 3	1.0192 p.u	1.0032 p.u	1.0051
5	Barra 17	1.0348 p.u	1.0193 p.u	1.01945
5	Barra 18	1.0282 p.u	1.0125 p.u	1.0132
5	Barra 25	1.0631 p.u	1.0360 p.u	1.0360
5	Barra 26	1.0616 p.u	1.0405 p.u	1.0405
5	Barra 27	1.0471 p.u	1.0284 p.u	1.0285
5	Barra 28	1.0617 p.u	1.0420 p.u	1.0420
5	Barra 29	1.0589 p.u	1.0400 p.u	1.0399
5	Barra 30	1.0475 p.u	0.9871 p.u	0.9871
5	Barra 34	1.0123 p.u	1.0202 p.u	0.9944
5	Barra 37	1.0278 p.u	1.0038 p.u	1.0038
5	Barra 38	1.0265 p.u	1.0100 p.u	1.0099
6	Barra 21	1.0403 p.u	1.0154 p.u	1.0199
6	Barra 22	1.0559 p.u	1.0200 p.u	1.0296
6	Barra 23	1.0522 p.u	1.0188 p.u	1.0287
6	Barra 35	1.0493 p.u	0.9995 p.u	1.0135
6	Barra 36	1.0635 p.u	1.0256 p.u	1.0429

En la tabla 3.20 se puede observar que en las dos metodologías los niveles de voltaje están dentro de las bandas de operación por lo cual para la metodología del híbrida se utiliza los nodos pilotos de la area1, area2 y área 3 de la metodología del flujo extendido de potencia

con los nodos pilotos del área 4, área 5 y área 6 de la metodología de la matriz jacobiana reducida, en la figura 3.20 se muestra la respuesta dinámica del sistema.

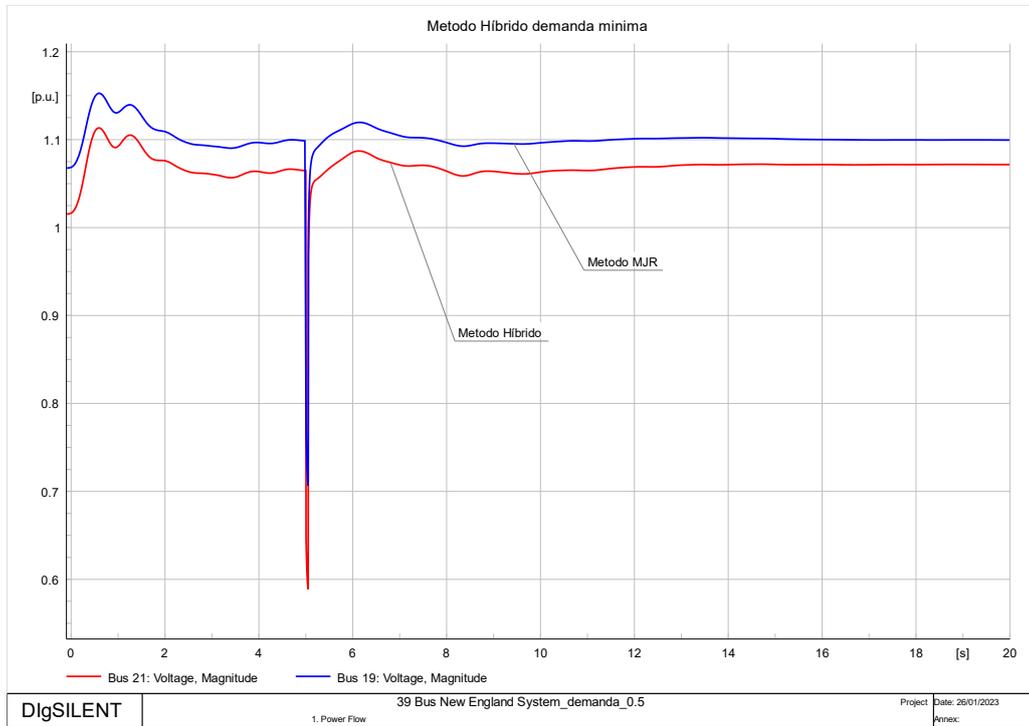


Figura 3.20. Respuesta dinámica del sistema con la metodología híbrida a demanda mínima.

3.2 CONCLUSIONES

- Mediante el uso de la metodología de la matriz jacobiana reducida se puede encontrar tanto los nodos pilotos y las áreas dinámicas de una manera determinística, para diferentes puntos de operación teniendo resultados de voltaje que están dentro de las bandas de operación.
- La matriz jacobiana reducida es una metodología que solo permite analizar un punto de operación a la vez, por lo cual proporciona una división de áreas solo para ese punto de operación, para un trabajo futuro se proponer plantear una metodología que permita abarcar varios puntos de operación para la división de áreas, con lo cual permita realizar un control de voltaje para diferentes puntos de operación con la misma división de áreas.
- La metodología del flujo extendido de potencia al ser una metodología heurística se pudo evidenciar que al realizar la elección de nodos pilotos para demanda máxima no se logró llegar a los niveles de voltaje que estén dentro de las bandas de operación, pero para los otros dos puntos de operación se tiene resultados similares a la metodología de la matriz jacobiana reducida.
- Se pudo observar que al realizar las simulaciones en los tres puntos de operación existía variaciones en la determinación de las áreas dinámicas o a su vez de los nodos piloto pudiendo comprobar que el control de voltaje es diferente para cada punto de operación.
- Se pudo evidenciar que el control de voltaje con los nodos pilotos y las áreas dinámicas también ayudan a la respuesta del sistema a cuando se presenta cortocircuitos permitiendo que el voltaje no se salga de las bandas de operación
- Al utilizar la metodología híbrida los niveles de voltaje luego de producirse un cortocircuito se puede observar que mejoran tanto en el punto de operación de demanda base y demanda máxima, pero para demanda mínima se tiene la misma respuesta al utilizar cualquiera de los dos métodos ya que los nodos pilotos en las dos metodologías son casi los mismos o están contactados eléctricamente entre ellos mediante líneas de transmisión.

3.3 RECOMENDACIONES

- Al utilizar la metodología de la matriz jacobiana reducida se debe definir correctamente el criterio para la elección del porcentaje de la energía capturada ya que si el porcentaje es muy alto en sistemas grandes la división de las áreas será incoherente.
- Al momento de utilizar el programa Phyton se debe tener importadas todas las librerías y además instalar la librería de pypower.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. G. Quichimbo, "Estabilidad de voltaje en sistemas de transmisión considerando la operación de transformadores con Tap's," Quito, 2019.
- [2] D. Sánchez, "Estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos de potencia incluyendo curvas de capacidad para líneas de transmisión basado en el método CPF," Quito, 2018.
- [3] L. Javier Arcos Guerrón Iván Santiago Flores Gómez, "Análisis de estabilidad transitorio del sistema nacional interconectado del Ecuador," Quito, 2007.
- [4] M. A. RIOS Ingeniero Eléctrico, P. Asociado, C. J. ZAPATA Ingeniero Electricista, O. GÓMEZ Ingeniero Electricista, and P. Auxiliar, "Medidas para mitigar problemas de estabilidad de voltaje," *Scientia et Technica Año XIV*, vol. 39, 2008.
- [5] López Julian, "Determinación y localización de zonas de mayor energía modal en sistemas eléctricos de potencia," Jan. 2013.
- [6] E. Mauricio and S. Rojas Página, "Detección de áreas débiles respecto a la estabilidad de tensión en tiempo real utilizando lógica difusa," 2013.
- [7] "Determinación y localización de zonas de mayor energía modal en sistemas eléctricos de potencia".
- [8] Q. Wang, S. S. Choi, and D. M. Zhang, "A Hierarchical Voltage-Reactive Power Control Scheme for a Radial Transmission System," 2004.
- [9] D. Alejandro and G. Bedoya, "Metodología para el análisis de estabilidad de tensión mediante la división de redes en áreas de control," 2014.
- [10] O. A. Logroño, "Ubicación óptima de dispositivos SVC para la mejora del margen de estabilidad de voltaje en sistemas de transmisión considerando el índice de estabilidad de voltaje I-index," Quito , 2021.

5. ANEXOS

ANEXO I. Enlace para la matriz de participación para las tres demandas.

ANEXO II. Enlace para las tablas del flujo extendido de potencia para las tres demandas

ANEXO III código para determinar las áreas dinámicas y los nodos pilotos

ANEXO I

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1LakL20jAqiFi3oFzh7ae5F9N81ffliO0/edit?usp=sharing&oid=108220049270297259216&rtpof=true&sd=true>

ANEXO II

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1296VCgMjto74Lg2DzNmaz5yk-CrPdcZ5/edit?usp=sharing&oid=108220049270297259216&rtpof=true&sd=true>

ANEXO III

''''

Created on Mon Dec 5 11:49:19 2022

''''

```
import numpy as np
import sys
from copy import copy
import cmath as cm
import scipy.sparse
import scipy.sparse.linalg
import runpf_m
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.sparse.linalg import spsolve, eigs
import scipy.linalg
from pypower.api import poption, printpf
# Carga de Sistemas de prueba
from case39_max import case39_max
# limpiar la pantalla
print("\014")
# criterio de energia modal
Energia_capturada=80 #
# importar datos del sistema
#####
# tomar datos
sistema_prueba=copy(case39_max())
sistema_prueba_m=copy(sistema_prueba)
sistema_prueba_m0=copy(sistema_prueba)

datos_barras = sistema_prueba['bus']
datos_barras_m =copy(datos_barras)
```

```

datos_barras_m0 =copy(datos_barras)

datos_lineas = sistema_prueba['branch']
datos_generadores = sistema_prueba['gen']
datos_generadores_m=copy(datos_generadores)
datos_generadores_m0=copy(datos_generadores)

S_base_sis=sistema_prueba["baseMVA"]

ppopt = ppoption(PF_ALG=1,PF_TOL=1e-5,PF_MAX_IT=10)
resultados_fp, convergencia, J_Q_V, dS_dVm, dS_dVa, Ybus = runpf_m.runpf(sistema_prueba,
ppopt)
resultados_flujo = resultados_fp['bus']
V_flujo=copy(resultados_flujo[:,7])
Ang_fp=copy(resultados_flujo[:,8])
ind_gen=(datos_generadores[:,0].astype(int))-1

printf(resultados_fp)

## Inicio del Algorimto

Y=scipy.sparse.csr_matrix.toarray(Ybus)

J11 = dS_dVa.real
J12 = dS_dVm.real
J21 = dS_dVa.imag
J22 = dS_dVm.imag
#Jqv=J22-J21@(invJ11@J12)
Jqv = J22 # Jacobiano exacto
#Jqv = -Ybus.imag #Jacobiano reducido
Jqv_d=scipy.sparse.csc_matrix.toarray(dS_dVa)

```

```

Jqv_m=scipy.sparse.csc_matrix.toarray(Jqv)

Jqv_by_Jqv_T=np.dot(Jqv_m,Jqv_m.T)

eigenvalues_2,Phix=np.linalg.eig(Jqv_by_Jqv_T)
eigenvalues_2x,Phi=np.linalg.eig(Jqv_m)

Psi = np.linalg.inv(Phi)

sing_vals=np.sqrt(abs(eigenvalues_2))

E_total=np.sum(sing_vals)
ENi=((sing_vals**2)/(np.sum(sing_vals**2)))*100

sing_vals_sorted=-np.sort(-sing_vals)
ENi_sorted = ((sing_vals_sorted**2)/(np.sum(sing_vals_sorted**2)))*100
ENi_acu = np.zeros((np.shape(sing_vals_sorted)[0],1))
lim = np.zeros((np.shape(sing_vals_sorted)[0],1))+Energia_capturada
ENi_acu[0]=ENi_sorted[0]
for i in range(np.shape(sing_vals_sorted)[0]-1):
    ENi_acu[i+1]=ENi_sorted[i+1]+ENi_acu[i]

n_areas=np.sum(ENi_acu<=Energia_capturada)+1
print('El número de áreas de control determinado es:', n_areas)

# Determinación de las barras que pertenecen a cada área

nij=((Psi**2).transpose()/(np.linalg.norm(Psi, axis=1)**2)).transpose()

nRij=np.zeros((nij.shape))

```

```

for i in range(nij.shape[1]):
    nRij[i,:]=nij[i,:]*ENi[i]

highest_vals_location=sing_vals.argsort()[-n_areas:][::-1]

# Matriz reducida
nRij_short=nRij[highest_vals_location,:]

# Asignación de barras a cada área
Areas=np.zeros((nRij_short.shape[1],1))

for i in range(nRij_short.shape[1]):
    Areas[i]=(nRij_short[:,i].argsort()[-1:][::-1])+1

# Redefinición del número de áreas

Nodos_piloto=np.zeros((n_areas,1))
n_barras_area=np.zeros((n_areas,1))
barras_area=np.zeros((n_areas,Ybus.shape[0]))
alerta=0
areas_eliminadas=0
for i in range(n_areas):
    temp=np.array([index for index,value in enumerate(Areas) if value == (i+1)])
    n_barras_area[i]=temp.shape[0]
    for i1 in range(int(n_barras_area[i])):
        barras_area[i,i1]=temp[i1]+1

    if temp.size!=0:
        nodo_temp=(-nRij_short[i,temp]).argsort()[-1:][::-1] # Barra piloto= barra con más
participación +

```

```

    check_gen=np.array([index for index,value in enumerate(ind_gen) if value ==
(temp[nodo_temp])])

    if check_gen.size==0:

        Nodos_piloto[i]=temp[nodo_temp]+1

    else:

        auxii=2

        while check_gen.size!=0 and auxii<=temp.size:

            nodo_tempx=((-nRij_short[i,temp]).argsort()[-auxii])

            Nodos_piloto[i]=temp[nodo_tempx]+1

            check_gen=np.array([index for index,value in enumerate(ind_gen) if value ==
(temp[nodo_tempx])])

            auxii=auxii+1

            if auxii==temp.size:

                alerta=1

            if check_gen.size!=0:

                Nodos_piloto[i]=temp[nodo_temp]+1

        else:

            Nodos_piloto[i]=0

            areas_eliminadas=areas_eliminadas+1

print('\n\nÁreas de control determinadas:\n')
print('No.\tNodo piloto\t\tBarras')

for i in range(n_areas):

    temp2=np.array([index for index,value in enumerate(Areas) if value == (i+1)])+1

    temp3= ' '.join([str(elem) for elem in temp2])

    print(i+1,'\t ', int(Nodos_piloto[i]),'\t\t','{0: <40}'.format(temp3))

```