

# Algoritmo de programación dinámica para conexión/desconexión diaria de compensación capacitiva en redes de distribución

Diego Iñiguez, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito – Ecuador  
 Juan Plazarte, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito – Ecuador  
 Hugo Arcos, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito – Ecuador

**Resumen** – El trabajo presenta el desarrollo de un algoritmo para el despacho óptimo de capacitores basado en programación dinámica para la reducción de pérdidas totales en sistemas de distribución. Para ello se incorpora un programa que resuelva el flujo de potencia en alimentadores de distribución (*FORWARD/BACKWARD*), introduciendo la proyección de demanda con 24 periodos del día. Se aplica el método de solución recursiva dentro de la programación dinámica donde se tiene la función objetivo: la reducción de pérdidas totales del sistema en análisis, y las restricciones de los límites de voltaje. El análisis efectuado sirve para determinar en qué periodo del día es recomendable tener conectados o desconectados los bancos de capacitores, con el fin que el operador realice esta maniobra.

**Índices** – programación dinámica, método recursivo, maniobra conexión/desconexión, periodos día, reducción de pérdidas.

## I. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es un servicio primordial dentro del desarrollo de un país. Ecuador por medio de la Agencia de Regulación y Control (*ARCONEL*) garantiza la eficiencia, continuidad y calidad del servicio eléctrico, al contar con la *REGULACION No CONELEC-004/01*, las empresas distribuidoras están en la obligación de cumplir con esta normativa. En los Sistemas Eléctricos de Distribución cuando existe una elevada carga reactiva se presentan problemas de regulación de voltajes, limitaciones de la capacidad del sistema y aumento de pérdidas eléctricas [1]. Estas deficiencias operativas en Empresas Distribuidoras ocasionan mayores costos internos que repercuten en la economía de las empresas.

Los capacitores al ser elementos compensadores son utilizados para minimizar pérdidas y aumentar los perfiles de

Este trabajo se lo elaboró gracias al apoyo de profesores de la Escuela Politécnica Nacional como el Dr. Hugo Arcos y el Msc. Juan Plazarte quienes dirigieron el proyecto de titulación de una manera eficiente, responsable y que gracias a los conocimientos impartidos se pudo culminar exitosamente este trabajo. De igual manera a la Empresa Eléctrica de Quito por brindar la asesoría y los datos necesarios para el análisis del método propuesto en el trabajo. A mis familiares y amigos que con su apoyo incondicional.

voltaje [2]. Las empresas distribuidoras realizan el despacho de capacitores en horas de mayor demanda, sin conocer si la operación efectuada es la óptima; además se ha determinado que la operación de bancos de capacitores, en la mayoría de los casos sobrepasan valores requeridos por el sistema en ese periodo del día, ocasionando gastos económicos innecesarios y problemas en la operación del sistema. Adicionalmente, al realizar las maniobras de conexión/desconexión del banco de capacitores se introducen perturbaciones a la red, teniendo inconvenientes en la operación del sistema. La excesiva repetición de maniobras de conexión/desconexión de bancos de capacitores agudiza mucho más los problemas colaterales que ya se presentan en el sistema como son: aparición de armónicos, sobre-voltajes de tipo interno en el sistema, corriente inrush y efectos resonantes [3].

Los modelos matemáticos como la programación lineal entera y a través de ésta el algoritmo de branch and bound tiene una complejidad computacional del  $O(n^2)$ ; es decir, mientras se incrementa el número de capacitores y número de periodos de análisis en el sistema eléctrico, las variables de decisión del programa aumentan ocasionando mayor tiempo de ejecución y mayor espacio de almacenamiento de variables.

Por esta razón se utiliza los algoritmos de programación dinámica que tiene una complejidad computacional  $O(\log(n))$  aproximadamente dependiendo el algoritmo particular utilizado; es decir, este método opera tomando decisiones en forma secuencial, disminuyendo tiempos de ejecución del programa y evitando que el almacenamiento se desborde [4].

La técnica de la Programación Dinámica tiene grandes ventajas, y una de ellas es la de ofrecer un diseño adecuado y eficiente a todos los problemas que puedan plantearse de forma recursiva y cumplan el principio de optimalidad [5].

## II. METODOLOGÍA

Esta sección desarrolla el método recursivo de la programación dinámica para el despacho óptimo de capacitores con el fin de reducir las pérdidas eléctricas totales

de un sistema de distribución, aplicando un algoritmo en *MATLAB* que resuelva la función objetivo e introduciendo el programa de flujos de potencia elaborado con el método *FORWARD/BACKWARD* y con la demanda diaria del sistema obtener como resultado los periodos óptimos de conexión/desconexión del banco de capacitores que cumpla restricciones de voltaje.

A. Flujo de Potencia

En Sistemas de Distribución es recomendable utilizar métodos con algoritmos de selección de variables como:

*Método Forward (selección hacia adelante):* Parte de un modelo sencillo y va agregando términos tomando en cuenta un criterio específico, hasta que no pueda añadir ningún término más; es decir, se introduce el valor más significativo en cada etapa hasta un criterio de parada [6]. Consiste en un barrido hacia adelante partiendo de los nodos más lejanos a la fuente, durante este barrido emplea las leyes de Kirchhoff de nodos hasta llegar al nodo raíz en este proceso considera un perfil inicial de voltaje [7].

*Método Backward (eliminación hacia atrás):* Parte de un modelo complejo que contiene todos los efectos que influyen en la respuesta del problema y en cada etapa elimina la variable menos significativa hasta que no haya otro término faltante que pueda eliminar [6]. Consiste en un barrido hacia atrás en este caso se parte desde el nodo raíz o fuente aplicando las leyes de Kirchhoff de voltaje y así obtener los nuevos voltajes hasta cumplir una tolerancia [7].

1) Algoritmo del Flujo de Potencia:

El algoritmo para la resolución del Flujo de Potencia describe los siguientes pasos:

Paso 1: Importar y leer las variables de entrada del sistema de distribución: número de nodo, resistencia, inductancia, nodo de envío, nodo de recepción, Demanda de potencia activa, Demanda de potencia reactiva.

Paso 2: Calcular la matriz orden de profundidad de los nodos (*Orden*), la matriz que relaciona las corrientes de rama con las corrientes inyectadas (*BIBC*), la matriz que relaciona las corrientes de cada rama con los voltajes en cada nodo (*BCBV*) y la matriz total del flujo de distribución (*DLF*). Con el uso de éstas matrices, determinar la corriente que fluye en cada rama del sistema (*IBr*), para nuestro desarrollo  $B=IBr$ .

Para el desarrollo del cálculo de las matrices según [10] se tiene un sistema de distribución como se muestra en la Fig. 1.

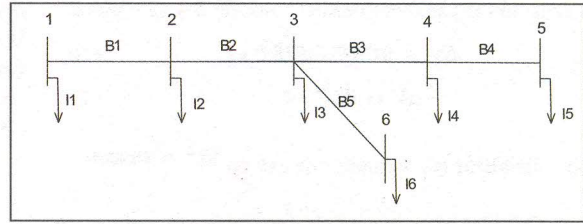


Fig. 1. Sistema de distribución de 6 nodos

En la Fig. 1 la potencia en cada nodo tiene un equivalente de corriente de inyección, se encuentra las corrientes de cada rama en función de las corrientes inyectadas en cada nodo aplicando las leyes de Kirchhoff de corrientes (*KCL*) y se tiene:

$$\begin{aligned} B_1 &= I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\ B_2 &= I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \\ B_3 &= I_4 + I_5 \\ B_4 &= I_5 \\ B_5 &= I_6 \end{aligned} \tag{1}$$

Estas ecuaciones pueden ser escritas en forma matricial de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \tag{2}$$

La expresión que relaciona la matriz de corrientes en cada rama (*B*) se escribe de manera general:

$$B = BIBC * I \tag{3}$$

De la Fig. 1 al aplicar KVL se obtiene los voltajes nodales:

$$V_2 = V_1 - B_1 Z_{12} \tag{4}$$

$$V_3 = V_2 - B_2 Z_{23} \tag{5}$$

$$V_4 = V_3 - B_3 Z_{34} \tag{6}$$

El  $V_4$  se puede expresar reemplazando las ecuaciones (4) y (5) en (6), se obtiene:

$$V_4 = V_1 - B_1 Z_{12} - B_2 Z_{23} - B_3 Z_{34} \tag{7}$$

De la ecuación (7) se deduce lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{46} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} \tag{8}$$

Con la ecuación (8) se deduce la expresión general:

$$\Delta V = BCBV * B \tag{9}$$

En la ecuación (9) se reemplaza el valor de  $B$  y se obtiene:

$$\Delta V = BCBV * BIBC * I \quad (10)$$

$$\Delta V = DLF * I \quad (11)$$

Paso 3: Inicializar las variables de estado  $V_i^0 = V_{slack}$

Paso 4: Calcular la corriente de inyección en cada nodo excepto el nodo raíz o fuente, para ello se calcula las corrientes de inyección producidas en los nodos donde existe carga o compensación.

$$I^k = \left( \frac{S_i}{V^{k-1}} \right)^* \quad (12)$$

Donde,  $I^k$  es la matriz de corrientes de inyección en cada nodo,  $S_i$  es la matriz de potencias de inyección en cada nodo incluyendo el efecto shunt del banco de capacitores (estos valores se multiplican por un valor de 3, porque se va a correr el flujo de potencia de cada fase como un sistema balanceado independiente),  $V^{k-1}$  es la matriz de voltajes en cada nodo del sistema,  $k$  es el número de iteraciones.

Calcular la corriente en cada rama del sistema utilizando la siguiente expresión:

$$I_{br}^k = BIBC * I^k \quad (13)$$

Donde,  $I_{br}^k$  es la matriz de corrientes que fluye por cada rama del sistema,  $BIBC$  es la matriz de corrientes equivalentes del sistema que fluyen a cada nodo,  $I^k$  es la matriz de corrientes de inyección en cada nodo,  $k$  es el número de iteraciones.

Paso 5: Calcular la matriz de las variaciones de voltaje en cada nodo, para ello primero se calcula DLF (flujo de distribución) con las siguientes expresiones:

$$DLF = BCBV * BIBC \quad (14)$$

$$deltV^k = DLF * I^k \quad (15)$$

Donde,  $deltV^k$  es la matriz de variaciones de voltaje en cada nodo,  $DLF$  es la matriz de conexiones de cada nodo,  $I^k$  es la matriz de voltajes en cada nodo del sistema.

Paso 6: Actualizar los voltajes en cada nodo hasta que se cumple el criterio de convergencia ( $Error < \epsilon$ ).

$$V^k = V^{k-1} - deltV^k \quad (16)$$

$$\|V^k - V^{k-1}\| \leq \epsilon \quad (17)$$

Paso 7: Calcular las pérdidas de cada rama y las pérdidas totales del sistema de distribución  $P_{pérdidas}$ .

$$P_{loss_{ij}} = I_{ij}^2 * R_{ij} \quad (18)$$

Donde,  $P_{loss_{ij}}$  son las pérdidas en cada rama del sistema,  $I_{ij}^2$  es el cuadrado de la corriente que circula por la rama  $ij$ ,  $R_{ij}$  es la resistencia de la rama  $ij$ ,  $i$  es el nodo de origen,  $j$  es el

nodo de llegada. Para obtener las pérdidas totales del sistema a la ecuación (18) se la divide para 3 debido que al correr cada fase como un sistema balanceado se tiene 3 veces las pérdidas en cada fase y se suma todas las pérdidas de cada rama y se obtiene:

$$P_{tLoss} = (\sum_{n=1}^m P_{loss_n}) / 3 \quad (19)$$

Donde,  $P_{loss_n}$  son las pérdidas en cada rama del sistema,  $n$  es el número de la rama,  $m$  es el número de ramas totales.

Paso 8: Repetir los pasos 4, 5, 6 y 7 para las fases  $a$  y  $b$ ; finalmente se obtiene las pérdidas totales con la expresión:

$$P_{pérdidas_{total}} = P_{loss_a} + P_{loss_b} + P_{loss_c} \quad (20)$$

Para el desarrollo del paso 2 del algoritmo del flujo de potencia se obtienen las matrices de la siguiente manera.

Obtención de la matriz *Orden*:

Paso 1: Leer los datos  $f$  (listado de nodo de envío) y  $t$  (listado del nodo de recepción)

Paso 2: Obtener mediante el comando de Matlab sparse la matriz de *CFT* (conexión de las ramas existentes en el sistema)

Paso 3: Con la matriz *CFT* aplicar el comando graphtraverse para la obtención de la matriz *Orden*.

Obtención de la matriz *BIBC*:

Paso 1: La matriz es de dimensión  $(l \times m)$  donde  $l$  y  $m$  tienen el tamaño de la matriz *Orden*.

Paso 2: En la matriz orden colocar 1 donde exista conexión y 0 donde no exista.

Obtención de la matriz *BCBV*:

Paso 1: La matriz es de dimensión  $(l \times m)$  donde  $l$  y  $m$  tienen el tamaño de la matriz *BIBC*.

Paso 2: Con la matriz *BIBC*, colocar en lugar de 1 su respectivo valor de la impedancia de la línea del tramo.

## 2) Diagrama de flujo del Flujo de Potencia

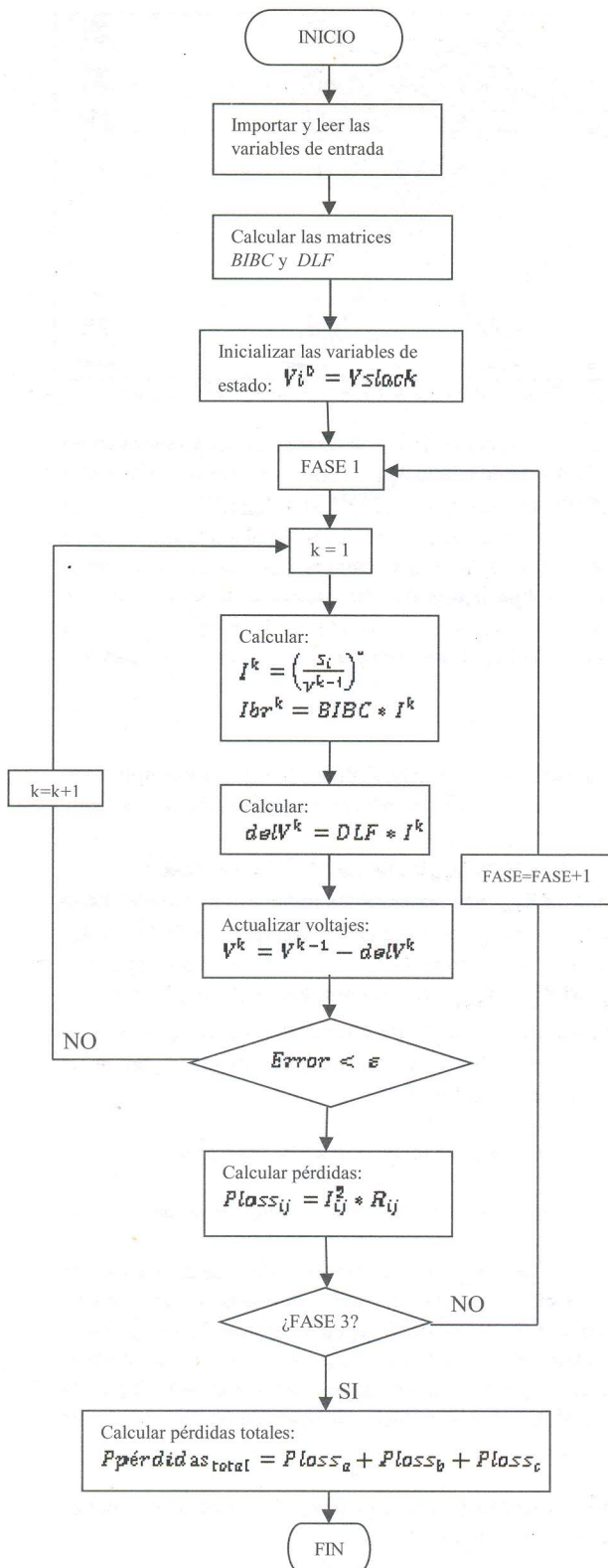


Fig. 2. Diagrama de flujo del Flujo de Potencia empleado en el despacho

En la Fig. 2. se describe el diagrama de flujo donde se muestra el desarrollo paso a paso del algoritmo del flujo de potencia descrito anteriormente.

### B. Despacho óptimo de capacitores para conexión/desconexión diaria de compensación reactiva

Esta sección aborda el desarrollo y planteamiento de la formulación matemática del problema del despacho óptimo de compensación reactiva basado en una demanda diaria teniendo como restricción los límites en los perfiles de voltaje, además introduciremos el algoritmo de flujo de potencia desarrollado en la sección anterior, con la finalidad de minimizar las pérdidas eléctricas totales del alimentador en análisis [8].

#### 1) Formulación del problema de Programación Dinámica

Para el desarrollo del despacho óptimo de capacitores se tiene un alimentador de cinco secciones y un banco de capacitores con tres capacitores de diferente capacidad  $Q_c$  como indica la Fig. 3., se considera  $n = 24$  periodos del día y se asume un modelo de carga  $PQ$ , además se tiene una curva de demanda conocida de un día.

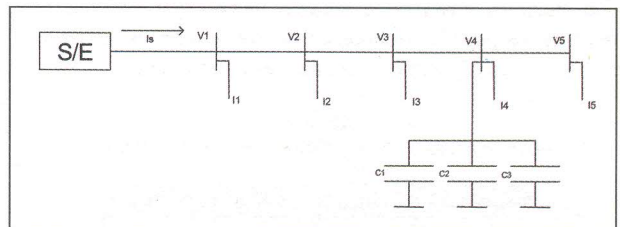


Fig. 3. Alimentador de distribución

El alimentador de la Fig. 3 contiene tres capacitores conectados  $C_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) con capacidades  $Q_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), se asume que los capacitores tienen una capacidad fija y son conectables, para que el operador pueda conectar o desconectar en el tiempo que se requiera hacer la maniobra. El problema es determinar el periodo de tiempo que cada capacitor debe estar conectado dependiendo de la variación de la demanda existente en el alimentador y cumpliendo las restricciones de límite de voltaje y la menor cantidad de número de la maniobra conexión/desconexión para un periodo de  $n = 24$  del día.

Se tiene los estados de conexión del banco de capacitores en cada periodo  $n$  del día, sea  $S_i(n)$   $i = 1, 2, 3, \dots$ , entonces:

$$S_i(n) = 1, \text{ el capacitor está conectado}$$

$$S_i(n) = 0, \text{ el capacitor está desconectado}$$

El problema es saber el estado de cada capacitor  $S_{C_i}(n)$  en cada uno de los  $n = 24$  periodos con el fin de reducir las pérdidas eléctricas totales del alimentador ( $P_{perdidas}$ ).

La formulación matemática del problema es la siguiente:

$$\text{minimizar } P_{\text{pérdidas}} = \sum_n^{24} P_n[S_{1(n)}, S_{2(n)}, \dots, S_{ct(n)}] \quad (21)$$

sujección:

$$K = \sum_n^{24} S_{i(n)} \oplus S_{i(n+1)} \quad (22)$$

$$V_j^{\text{min}} \leq V_j \leq V_j^{\text{max}} \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (23)$$

Donde,  $n$  es el número de escenarios o periodos de tiempo,  $ct$  es el número total de capacitores instalados,  $m$  es el número de nodos del sistema,  $K$  es el número de switcheos de los capacitores,  $P_n[S_{1(n)}, S_{2(n)}, \dots, S_{ct(n)}]$  son las pérdidas totales en la hora  $n$  donde el capacitor  $C_i$  ( $1, 2 \dots ct$ ) en esa hora es  $S_{i(n)}$ ,  $V_i$  es el voltaje en el nodo envío,  $V_j$  es el voltaje en el nodo recepción,  $V_j^{\text{min}}$  es el voltaje límite mínimo,  $V_j^{\text{max}}$  es el voltaje límite máximo,  $\oplus$  es el OR exclusivo un operador lógico que:  $S_{i(n)} \oplus S_{i(n+1)} = 1$  cuando  $S_{i(n)} \neq S_{i(n+1)}$ ;  $S_{i(n)} \oplus S_{i(n+1)} = 0$  cuando  $S_{i(n)} = S_{i(n+1)}$ .

El objetivo de la programación dinámica es de minimizar las posibles trayectorias que se tiene en el desarrollo del problema, al tener  $n = 24$  periodos del día y  $S_{i(n)}$  estados posibles del banco de capacitores.

Las posibles trayectorias tendrán mucho que ver con el número de los posibles estados de los capacitores así se tiene que para los tres capacitores los posibles estados son:

TABLA I  
ESTADOS POSIBLES EN UN PERIODO DEL DÍA PARA TRES CAPACITORES

Escenarios	$S_{1(n)}$	$S_{2(n)}$	$S_{3(n)}$
$X_{0,1}$	0	0	0
$X_{0,2}$	0	0	1
$X_{0,3}$	0	1	0
$X_{0,4}$	0	1	1
$X_{0,5}$	1	0	0
$X_{0,6}$	1	0	1
$X_{0,7}$	1	1	0
$X_{0,8}$	1	1	1

En la Tabla I se tiene los posibles escenarios en un periodo del día  $n$ , sin embargo  $n = 1, 2 \dots 24$ . Por tanto, el problema describe la siguiente expresión:

$$X_{n,m} = [S_{1(n)}, \dots, S_{ct(n)}] \quad (24)$$

Donde,  $X_{n,m}$  es el escenario posible del capacitor,  $S_{1(n)}$  es el estado posible del capacitor 1,  $S_{ct(n)}$  es el estado posible del capacitor  $ct$ ,  $n$  es el número de periodos o escenarios (24 periodos),  $m$  es el número de posibles estados de los capacitores.

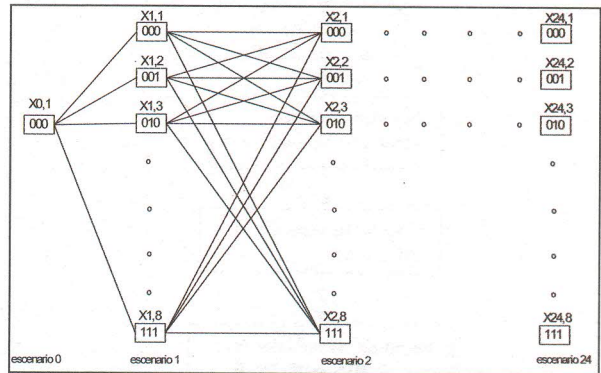


Fig. 4. Diagrama de estado de los 24 escenarios para tres capacitores

Como se observa en la Fig. 4, la trayectoria empieza en un escenario 0 y se tiene que  $X_{0,1} = 000$ , los valores a almacenar son  $(2^n)^{24}$  en este caso  $(2^3)^{24} \approx 4,72 \times 10^{21}$ , trayectorias posibles a través de los 24 escenarios. El objetivo es encontrar una trayectoria factible que cumpla con las restricciones y minimice las *Ppérdidas* del alimentador en análisis. Como se observa existen demasiadas trayectorias de ahí que se utiliza la programación dinámica y dentro de ésta el método recursivo.

### 2) Solución recursiva

La solución del despacho óptimo de capacitores aplicando el método de solución recursiva se define de la siguiente manera [9]:

$$f_{X_{n,m}} = \min_{X_{n-1,m}} (f_{X_{n-1,m}} + R(X_{n-1,m}, X_{n,m})) \quad (25)$$

Donde,  $f_{X_{n,m}}$  son las pérdidas mínimas acumuladas hasta el estado  $X_n$ ,  $X_{n-1}$  son los estados posibles que llevan a  $X_n$ ,  $f_{X_{n-1}}$  son las pérdidas mínimas acumuladas hasta el estado  $X_{n-1,m}$ ,  $R(X_{n-1}, X_{n,m})$  son las pérdidas en el alimentador en el estado  $X_{n,m}$  que tienen como estado predecesor  $X_{n-1}$ ,  $n$  es el número de periodos o escenarios (24 periodos),  $m$  es el número de estados posibles.

### 3) Algoritmo del despacho óptimo de capacitores

El algoritmo esta descrito por los siguientes pasos:

Paso 1: Importar y leer las variables de entrada del sistema de distribución: número de nodo, resistencia, inductancia, nodo de envío, nodo de recepción, Demanda de potencia activa, Demanda de potencia reactiva. A esto se le añade la lectura de la curva de demanda, capacidad del banco de capacitores instalados y lugar de instalación del banco de capacitores.

Paso 2: Crear la matriz de estados y la matriz de escenarios para las  $n=24$  periodos.

Paso 3: Incorporar el algoritmo del flujo de potencia para obtener los voltajes y ángulos de cada nodo, así como las

pérdidas totales del sistema tomando en cuenta el estado conexión/desconexión de los capacitores.

Paso 4: Calcular las pérdidas del alimentador para el escenario  $n$ .

Paso 5: Calcular las pérdidas del alimentador para el escenario  $n + 1$ , si en este estado se incumple los valores de límite de voltaje permitido  $P_{pérdidas}$  de ese estado toma un valor de  $inf$ . Determinar la diferencia de las pérdidas del escenario  $n + 1$  y su predecesor  $n$ .

$$\Delta P = P_{(n+1)} - P_{(n)} \quad (26)$$

Donde,  $\Delta P$  son los pesos o valores de pasar de un estado a otro del escenario  $n - 1$  al escenario  $n$ ,  $P_{(n+1)}$  son las pérdidas totales del escenario  $n + 1$ ,  $P_{(n)}$  son las pérdidas totales del escenario  $n$ .

Paso 6: Determinar el mínimo valor de  $\Delta P$  de los estados factibles en el escenario  $n$ .

Paso 7: Obtener la matriz de ubicaciones ( $Ub$ ) donde se irán guardado los estados escogidas en cada  $n$  (escenario) y la matriz de almacenamiento de potencia de pérdidas ( $S_p$ ) donde se van guardando las pérdidas acumuladas de las diferentes trayectorias en cada escenario.

Paso 8: Desarrollar la solución recursiva de la programación dinámica, calcular  $f_{X_{24,op}}$  con la ecuación (25). Para el primer valor se tiene  $f_{X_{v,b}}=0$  con su estado inicial  $X_{v,b}=0,0,0$ .  $f_{X_{24,op}}$  será es mínimo valor de las pérdidas acumuladas en  $S_p$  durante el proceso iterativo.

Paso 9: Obtener los estados de los capacitores; es decir, el camino en donde  $f_{X_{24,op}}$  es el menor valor. Estos valores se obtienen de la matriz de ubicaciones donde se fueron almacenados los estados de la trayectoria escogida.

Paso 10: Obtener el número de operaciones de cada capacitor de la trayectoria óptima, verificar que cumpla con la ecuación (22) del número de operaciones conexión/desconexión. Para ello hemos colocado un factor de switcheos que evita el excesivo número de la maniobra conexión/desconexión.

Paso 11: Obtener el despacho óptimo de los capacitores y las pérdidas totales del alimentador en cada  $n$  periodo.

4) Diagrama de flujo del despacho óptimo de capacitores

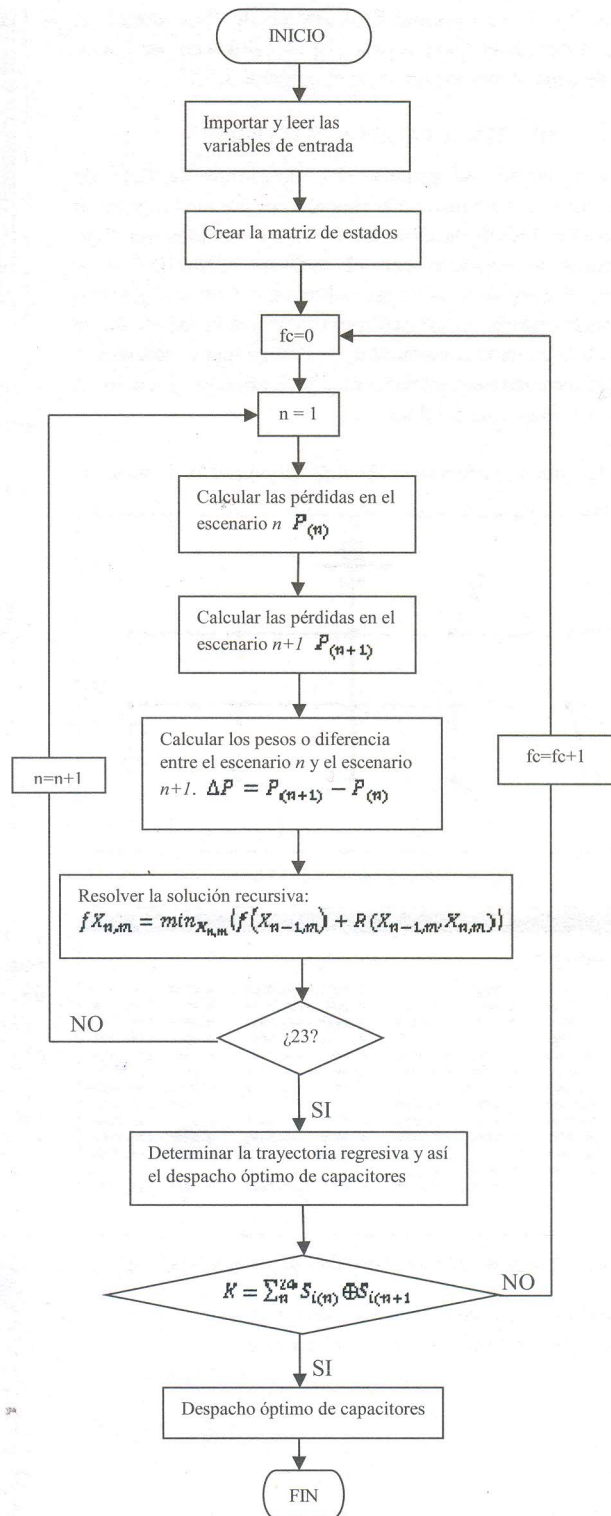


Fig. 5. Diagrama de flujo del despacho óptimo de capacitores para  $n = 24$  periodos

En la Fig. 5. se describe el diagrama de flujo donde se muestra el desarrollo paso a paso del algoritmo del despacho óptimo de capacitores expuesto en el numeral 3.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se prueban los algoritmos de flujo de potencia para un sistema de distribución, así como el algoritmo del despacho óptimo de capacitores. Los resultados del flujo de potencia se verifican con el software *CYMDIST* y se determina el error con los valores obtenidos. Con el algoritmo del despacho óptimo de capacitores se verifica la reducción de pérdidas totales en el alimentador, se realiza una comparación con todos los capacitores conectados y se observa el efecto en pérdidas y voltaje que produce.

#### A. Pruebas para el algoritmo de flujo de potencia, sistema de 13 nodos

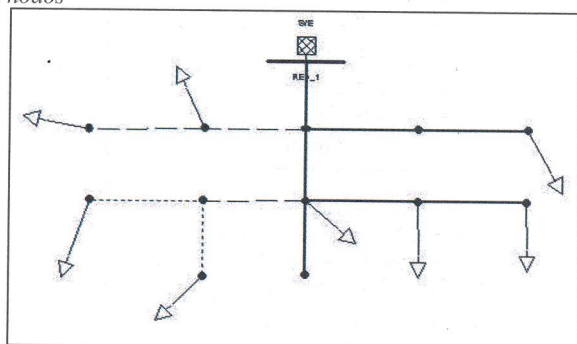


Fig. 6. Sistema de prueba de 13 nodos

Command Window						
RESULTADOS =						
1.0000	1.0000	0	1.0000	-120.0000	1.0000	120.0000
2.0000	0.9888	-0.5988	0.9893	-120.4781	0.9872	119.4476
3.0000	0.9820	-0.7644	0.9840	-120.5932	0.9819	119.3320
4.0000	0	0	0.9651	-120.7907	0.9872	119.4476
5.0000	0.9794	-1.1320	0.9846	-120.7046	0.9760	118.9389
6.0000	0.9812	-0.7958	0.9834	-120.6158	0.9813	119.3093
7.0000	0	0	0.9516	-121.0122	0.9872	119.4476
8.0000	0.9748	-1.1094	0	0	0.9705	118.8203
9.0000	0.9743	-1.1731	0.9837	-120.6936	0.9702	118.9929
10.0000	0.9794	-1.1320	0.9846	-120.7046	0.9760	118.9389
11.0000	0	0	0	0	0.9650	118.7013
12.0000	0.9653	-1.0610	0	0	0	0
13.0000	0.9613	-1.2779	0.9815	-120.6661	0.9612	119.0575

Fig. 7. Resultados de la corrida del flujo de potencia (MATLAB)

Los valores de cero en los voltajes obtenidos en la Fig. 7 significan que esa fase no existe en el sistema.

Nombre nodo	VA (pu)	Angulo VA (°)	VB (pu)	Angulo VB (°)	VC (pu)	Angulo VC (°)
1	1,000	0,00	1,000	-120,00	1,000	120,00
2	0,989	-0,60	0,989	-120,48	0,987	119,45
3	0,982	-0,76	0,984	-120,59	0,982	119,33
4	0,981	-0,78	0,984	-120,61	0,981	119,32
5			0,965	-120,79	0,987	119,45
6			0,957	-120,92	0,987	119,45
7	0,979	-1,13	0,985	-120,70	0,976	118,94
8	0,975	-1,19			0,971	118,82
9					0,965	118,70
10	0,965	-1,06				
11	0,974	-1,17	0,984	-120,69	0,970	118,99
12	0,961	-1,28	0,982	-120,67	0,961	119,06
13	0,979	-1,13	0,985	-120,70	0,976	118,94

Fig. 8. Resultados de la corrida del flujo de potencia (*CYMDIST*)

En la Tabla II se observa la comparación de los resultados obtenidos en MATLAB con los del programa *CYMDIST*.

Cálculo del error relativo.

TABLA II  
CÁLCULO DEL ERROR DE VOLTAJES Y ÁNGULOS EN EL SISTEMA DE 13 NODOS.

Nodo	Error Relativo (%)					
	Error (Va)	Error (δa)	Error (Vb)	Error (δb)	Error (Vc)	Error (δc)
1	0	0	0	0	0	0
2	0,02	0,20	0,03	0	0,02	0
3	0	0,58	0	0,25	0,01	0
4	0	0	0,01	0	0,02	0
5	0,04	0,18	0,04	0	0	0
6	0,02	2,03	0,06	0	0,03	0
7	0	0	0,56	0,08	0,02	0
8	0,02	0,05	0	0	0,05	0
9	0,03	0,27	0,03	0	0,02	0,04
10	0,04	0,18	0,04	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0

En la Tabla II se observa que los errores de voltaje y ángulos son casi despreciables. Se utiliza el algoritmo de flujos de potencia basado en la metodología *FORWARD/BACKWARD* que no tienen problemas de convergencia como el método de *Newton-Raphson*, esto se logra porque no se tiene una matriz grande como la *Ybarra*. Estas nuevas metodologías son las que aplica el software *CYMDIST*.

TABLA II  
CÁLCULO DEL ERROR DE PÉRDIDAS EN EL SISTEMA DE 13 NODOS.

Rama	MATLAB			CYMDIST		
	P loss_a (kW)	P loss_b(kW)	P loss_c(kW)	P loss_a(kW)	P loss_b(kW)	P loss_c(kW)
1_2	6,6	5,2	7,2	6,6	5,2	7,2
2_3	0,8	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5
2_4	0	8,7	0	0	8,6	0
2_5	4,8	1,1	5,7	4,9	1,1	5,7
3_6	0,1	0	0	0,1	0	0
4_7	0	2,7	0	0	1,6	0
5_8	0,5	0	0,8	0,5	0	0,8
5_9	2,5	0,1	3,1	2,5	0,1	3,1
5_10	0	0	0	0	0	0
8_11	0	0	0,8	0	0	0
8_12	1,4	0	0	1,5	0	0
8_13	6,2	0,2	2,9	6,2	0,2	4
SUMA	22,9	18,5	21	23	17,2	20,3
TOTAL	62,4			60,5		
Error (%)				3,2		

En la Tabla III los valores de las pérdidas obtenidos en cada rama tienen un pequeño error. Al realizar la suma de todos los valores la diferencia en el error aumenta como se puede apreciar en la comparación de los resultados, obteniendo un error relativo del 3,2%. La variación en las pérdidas totales puede ser debido a que en CYMDIST modela de manera mucho más exacta cada elemento que compone el sistema de distribución.

El resultado de pérdidas totales es muy importante para la resolución del algoritmo del despacho óptimo de capacitores, por esta razón el error que se obtiene está en el rango permitido para continuar con el desarrollo del proyecto.

**B. Pruebas para el algoritmo de flujo del despacho óptimo de capacitores, sistema de prueba de 34 nodos**

TABLA III  
COMPARACION Y CÁLCULO DE LA VARIACIÓN DE LAS PÉRDIDAS TOTALES CUANDO LOS CAPACITORES ESTÁN CONECTADOS Y CON EL DESPACHO ÓPTIMO

HORA	P <sub>on</sub> (kW)	P <sub>óptimo</sub> (kW)
1	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0)
2	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0)
3	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0)
4	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0)
5	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0)
6	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0)
7	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0)
8	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0)
9	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0)
10	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1)
11	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1)
12	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1)
13	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1)
14	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1)
15	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1)
16	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1)
17	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1)
18	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1)
19	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)
20	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)
21	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)
22	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1)
23	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1)
24	(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)	(1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1)
	<b>Pérdidas totales (kW)</b> 1306,8	<b>Pérdidas totales (kW)</b> 1057
	<b>Variación de pérdidas (%)</b>	<b>19,1</b>

En la Tabla IV muestra que la variación de pérdidas es del 19,1% un valor a tomar en cuenta en cuando a mejora en la calidad del servicio y menores pérdidas técnicas producidas lo que repercute en costos para la empresa distribuidora.

**C. Aplicación del algoritmo del despacho óptimo de capacitores en el alimentador 01C de la EEO.**

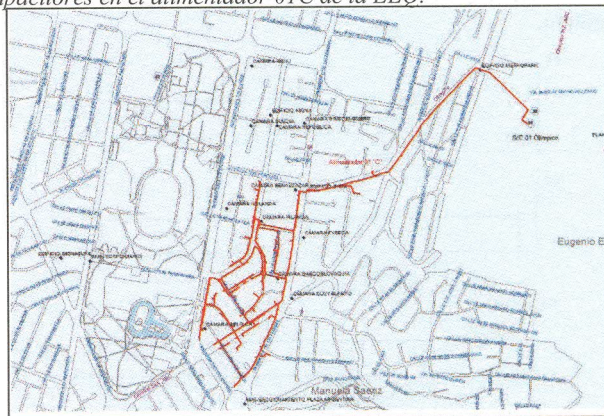


Fig. 9. Alimentador 01C de la EEO

TABLA V  
COMPARACIÓN Y CÁLCULO DE LA VARIACIÓN DE LAS PÉRDIDAS TOTALES CUANDO LOS CAPACITORES ESTÁN CONECTADOS Y CON EL DESPACHO ÓPTIMO

HORA	P <sub>on</sub> (kW)	P <sub>óptimo</sub> (kW)
1	(1, 1, 1)	(0, 1, 1)
2	(1, 1, 1)	(0, 1, 1)
3	(1, 1, 1)	(0, 1, 1)
4	(1, 1, 1)	(0, 1, 1)
5	(1, 1, 1)	(0, 1, 1)
6	(1, 1, 1)	(0, 1, 1)
7	(1, 1, 1)	(0, 1, 1)
8	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
9	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
10	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
11	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
12	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
13	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
14	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
15	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
16	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
17	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
18	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
19	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
20	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
21	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
22	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
23	(1, 1, 1)	(0, 1, 1)
24	(1, 1, 1)	(0, 1, 1)
	740,5	704,7
	<b>Variación de pérdidas (%)</b>	<b>4,8</b>

En la Tabla V se muestra que se redujo 4,8% las pérdidas totales del alimentador, la reducción de pérdidas es pequeña debido a que el alimentador bordea continuamente demandas



altas y por lo tanto necesita continuamente la conexión del banco de capacitores para que sus voltajes no salgan de límite permitido.

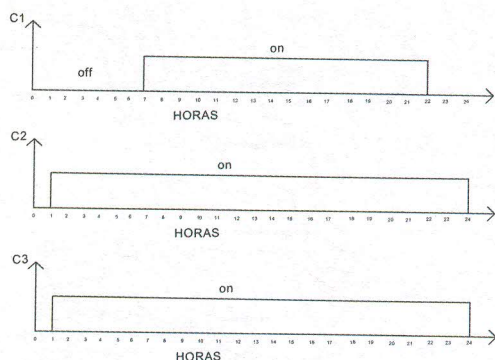


Fig. 10. Operación óptima conexión/desconexión de los capacitores para n=24 escenarios

#### IV. CONCLUSIONES

El flujo de potencia implementado para sistemas de distribución tiene tiempos de convergencia menores en comparación a métodos tradicionales como *Newton Raphson* debido a que no se aplica el uso de la matriz *Ybarra*, que al ser un sistema de distribución cuenta con muchos ceros en su estructura y complica la convergencia del flujo de potencia.

El método *FORWARD/BACKWARD* facilita la convergencia en sistemas grandes de distribución ya que utiliza un método de selección de variables rápido y robusto, el método implementado se basa en la sumatoria de corrientes.

El algoritmo de flujo de potencia presentado permite hacer un análisis de voltajes, ángulos, corrientes, pérdidas en cada rama, pérdidas totales del sistema, con requerimientos reducidos de memoria computacional.

Con el despacho óptimo de capacitores se produce una reducción en las pérdidas totales del sistema, ya que los capacitores operan únicamente en los periodos donde el sistema necesita compensación.

Con el despacho óptimo de capacitores se logra una mejora en los niveles de voltaje en cada nodo del sistema teniendo como resultado una mejora en el servicio y calidad de la energía eléctrica.

Las pérdidas en el despacho óptimo de los capacitores en el alimentador 01C de la EEQ reducen en poco porcentaje, esto se debe a que el sistema escogido posee pequeñas pérdidas, además debido a su curva de demanda los capacitores deben estar conectados casi en todos los periodos del día.

El algoritmo propuesto puede ser utilizado para análisis de sistemas de distribución con carga balanceada o desbalanceada, se debe tener cuidado con las potencias de entrada ya que para la ejecución del flujo resuelve cada fase como un sistema balanceado independiente de las demás fases.

Con este algoritmo el operador podrá programar el despacho óptimo del banco de capacitores por cada día según la curva de demanda que se tenga proyectada para el día en análisis.

Se recomienda para próximos trabajos de titulación incorporar al algoritmo los diferentes modelos de carga, en este proyecto se toma solo el modelo *PQ* para la carga.

Se recomienda variar el algoritmo para que lee los datos de entrada de manera similar a los datos del *CYMDIST*, con esto evitaremos la demora en la toma de datos de entrada del programa.

#### V. REFERENCIAS

- [1] G. Estrada, "Metodología Técnico-económica de Localización de capacitores en Sistemas de Distribución para la Reducción de Pérdidas Eléctricas," Instituto Tecnológico de Morelia, 2003.
- [2] V. Chamorro, "Minimización de pérdidas de energía en alimentadores primarios de distribución mediante la instalación de capacitores paralelo. Método de variaciones locales," Escuela Politécnica Nacional, 1986.
- [3] M. Galarza, "Localización óptima de capacitores en redes primarias de distribución vía algoritmos genéticos," Escuela Politécnica Nacional, 2009.
- [4] I. Flores, "Programación Dinámica," in 2010.
- [5] F. Hillier and G. Lieberman, *Introducción a la investigación de operaciones*, Novena., vol. 39, no. 5. Mexico: McGrawHill, 2010.
- [6] A. González, "Selección de variables: Una revisión de métodos existentes," Universidad da Coruña, 2015.
- [7] R. M. de Castro, "Análisis de Flujos de Carga para el análisis de Redes de Distribución. Implementación del algoritmo Forward and Backward", Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
- [8] I. D. Oscar Miranda Urióstegui México, "Minimización De Pérdidas En Redes De Distribución Empleando Programación Dinámica," 2009.
- [9] Y. Hsu and H. Kuo, "Dispatch of capacitors on distribution system using dynamic programming," *IEEE International Conference on Computer, Communication, and Signal Processing*, vol. 14, no. S3, pp. 9-12, 1993.
- [10] Teng, J. H., "A Network-Topology Based Three-Phase Load Flow for Distribution Systems," *Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A)*, Vol. 24, No. 4, pp. 259-264, 200.

## VI. BIOGRAFÍAS



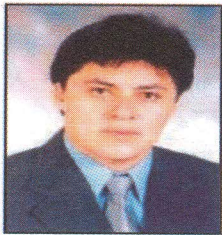
**Diego Felipe Iniguez Fernández**, nació en Loja-Ecuador el 21 de agosto de 1990. Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Superior Tecnológico “Daniel Álvarez Burneo”. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero Eléctrico en 2019.

Áreas de interés: calidad de la energía eléctrica, distribución de la energía eléctrica y sistemas eléctricos de potencia. (diego.iniguez@epn.edu.ec)



**Juan Calos Plazarte Achig.**, recibió el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional, EPN. Obtuvo el título M.Sc. en Investigación de Operaciones en la misma universidad. Actualmente trabaja en la Corporación Eléctrica del Ecuador Unidad de Negocio Transelectric en el Departamento de Planeamiento de Expansión de la Transmisión.

Adicionalmente es docente de la Facultad de Ingeniería Eléctrica en la EPN en la cátedra de Optimización y de manera continua dictando el seminario de PowerFactory Avanzado. La línea de investigación y desarrollo se encuentra enfocado en la optimización de sistemas eléctricos de potencia y desarrollo de software de alto rendimiento para combinar modelos eléctricos, optimización y algoritmos. (juan.palzarte@celec.gob.ec)



**Hugo Arcos Martínez**, nació en Quito, Ecuador, en 1972. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 1998, y el de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan en 2003. Ha desarrollado su carrera profesional en diversas instituciones del Sector Eléctrico Ecuatoriano y actualmente se desempeña como Coordinador de la Carrera de Ingeniería

Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés son: Modelación en Sistemas Eléctricos de Potencia, Estudios de Transitorios Electromagnéticos y Electromecánicos, Redes Inteligentes, Energías Renovables, Confiabilidad de SEP, Planificación de Sistemas de Potencia, entre otras. (hugo.arcos@epn.edu.ec).