Ajuste de Cambiador de Tomas por Análisis de Sensibilidad

Francisco M. González-Longatt
fglongatt@hotmail.com
Diciembre, 2003

I. Resumen.

El uso de transformador con cambiador de toma persigue controlar el flujo de MVAR o el voltaje en una barra dentro de limites, su simulación en el flujo de potencia implica el uso de iteraciones de ajuste, en este documento se presenta los fundamentos y un ejemplo del análisis de sensibilidad aplicado al ajuste del ajuste del tap, en el proceso iterativo de Newton Raspón para flujo de potencia. Este ajuste, el voltaje controlado es la función deseada y es expresada en términos del vector de estado del sistema.

Palabras Claves: *Ajuste, Sensibilidad, Tap, Flujo de Potencia*

II. Introducción

En el problema de flujo de potencia tradicional es necesario incluir *"ajustes"* en los métodos de solución para simular las estrategias de control que permiten la operación del sistema de potencia: Ajuste automático de MVAR, el transformador con tomas variables y desfasador y el uso de barras oscilantes en diferentes áreas para el control del intercambio neto entre áreas. Las variables involucradas en estos controles pueden ser divididas en *variables ajustables* y *variables restringidas* Las variables ajustables son asumidas constantes a menos que las restricciones asociadas a éstas excedan los límites especificados. Cuando esto sucede, las variables ajustables son permitidas que varíen, hasta que las variables restringidas vuelvan dentro de sus límites. Si haciendo esto, las variables ajustables alcanzan sus límites, estas son fijadas al límite y las variables restringidas se le permite que salgan de sus límites especificados [1].

La *iteraciones de ajuste* se emplean para considerar las estrategias de control dentro de la solución del flujo de potencia. Los enfoques que son empleados comúnmente para incorporar el ajuste dentro del proceso de solución de flujo de potencia son [2]:

1. El *ajuste por realimentación del error*, involucra la modificación de una variable de control para mantener la variable funcionalmente dependiente a un valor especificado en un mecanismo de lazo cerrado [2]. Es decir, se fija la variable restringida al límite violado y se permite a la variable ajustada asociada cambiar por la modificación del conjunto de variables.
2. El *ajuste automático* se basa en la modificación de la matriz Jacobiana para ajustar equitativamente las restricciones, con el objeto de dirigir la solución de las variables de control [2]. Es posible el uso de *coeficientes de sensibilidad* para modificar la variable ajustada con la idea de traer la variable restringida dentro de sus límites.

A lo largo de este documento se persigue efectuar una simple exposición del problema de flujo de potencia, incorporando iteración de ajuste para incluir el cambiador automático de tomas en transformadores.

III. Flujo de Potencia: Problema Clásico

El problema del flujo de potencia, consiste en el cálculo de los voltajes de barra y los flujos de potencia por los elementos ramas, una vez que la topología, impedancias, carga y generadores han sido especificados. Cada barra es caracterizada por cuatro parámetros, tales que una vez especificados dos de ellos, los restantes pueden ser calculados mediante la solución de la ecuación de balance de potencias:

$$P_i^{esp} + jQ_i^{esp} = P_i^{calc} + jQ_i^{calc} = V_i I_i^* \quad \text{para } i = 1, 2, ..., n \tag{1}$$

donde la potencia especificada en cara barra debe ser igual a la potencia que fluye hacia el sistema, cumpliéndose $[Y]V = I$. (1) es un conjunto de $2n$ ecuaciones, cuando se desdobla en parte real e imaginaria:

$$\begin{aligned} P_i^{esp} &= \sum_{j=1}^{n} |Y_{ij}||V_i||V_j| \cos(\delta_i - \delta_j + \theta_{ij}) \\ Q_i^{esp} &= -\sum_{j=1}^{n} |Y_{ij}||V_i||V_j| sen(\delta_i - \delta_j + \theta_{ij}) \end{aligned} \tag{2}$$

Donde: $V_i = |V_i|\angle\delta_i, V_j = |V_j|\angle\delta_j, Y_{ij} = |Y_{ij}|\angle\theta_{ij}$

III.1. Ecuaciones y Metodología de Solución: *Fundamentos*

Considere un sistema de potencia para pruebas (Figura 1). La Barra-1 se considera del tipo slack, siendo conocida $|V_1|\angle\delta_1$, las Barras 2 y 3 se toman como de carga, siendo conocido potencia activa y reactiva total demandada (P_2, Q_2, P_3, Q_3).

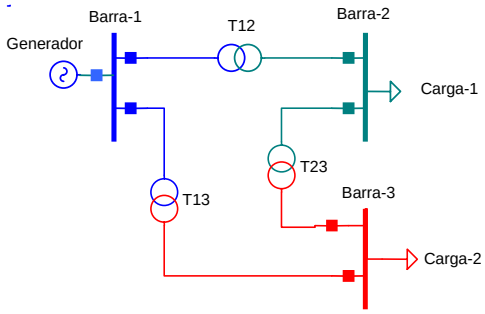


Figura 1. Sistema de prueba

El conjunto de ecuaciones que corresponde es este sistema es:

$$\begin{cases} P_2 - \sum_{\substack{j=1\\ j\neq 2}}^{3} |Y_{2j}||V_2||V_j|\cos(\delta_2 - \delta_j + \theta_{2j}) = 0 \\ P_3 - \sum_{\substack{j=1\\ j\neq 3}}^{3} |Y_{3j}||V_3||V_j|\cos(\delta_3 - \delta_j + \theta_{3j}) = 0 \\ Q_2 + \sum_{\substack{j=1\\ j\neq 2}}^{3} |Y_{2j}||V_2||V_j| sen(\delta_2 - \delta_j + \theta_{2j}) = 0 \\ Q_3 + \sum_{\substack{j=1\\ j\neq 3}}^{3} |Y_{3j}||V_3||V_j| sen(\delta_3 - \delta_j + \theta_{3j}) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

(1.3) corresponde a un conjunto de ecuaciones no lineales, en base a las variables $|V_2|, |V_3|, \delta_2, \delta_3$.

En forma general, el problema de flujo de potencia puede ser escrito como una ecuación de balances de potencia:

$$\vec{g}(\vec{x}, \vec{y}) = 0 \quad (4)$$

siendo $\vec{x}$ *el vector de variables de estado, o variables dependientes* y $\vec{y}$ el vector de variables independientes:

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} |V_2| \\ |V_3| \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} \qquad \vec{y} = \begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix}$$

El vector de estado del sistema se puede obtener de la solución de (4) por técnicas iterativas.

La técnica iterativa de Jacobi, se basa en crear una función aproximante Φ de la forma:

$$\vec{x}_k = \Phi(\vec{x}_{k-1}, \vec{y})$$

Siendo $\vec{x}_k$ el vector de estado de la iteración *k*.

Una mejora de Jacobi, es Gauss-Seidel (GS), en el cual se emplean directamente las aproximaciones de voltaje de la misma iteración para aproximar las otras barras. Por otra parte, la técnica de Newton-Raphson (NR), proveniente del desarrollo de series de Taylor de (2.3). (se asume $\vec{y}$, constante)

$$\vec{g}(\vec{x} + \Delta x) = \vec{g}(\vec{x}) + \frac{\partial \vec{g}(\vec{x})}{\partial \vec{x}} \Delta x$$

De modo que el vector de estado de la iteración (*k* + *1*) viene dado por:

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k + \Delta\vec{x}$$

Siendo:

$$\Delta\vec{x}_k = \left[\frac{\partial \vec{g}(\vec{x}_k)}{\partial \vec{x}}\right]^{-1} \left[\vec{g}(\vec{x}_k + \Delta\vec{x}) - \vec{g}(\vec{x}_k)\right]$$

Donde: $\frac{\partial \vec{g}(\vec{x}_k)}{\partial \vec{x}}$ se conoce como el Jacobiano de (4). En el caso del flujo de potencia $\vec{g}(\vec{x}_k + \Delta\vec{x})$, corresponde al valor de balance de potencia deseado, o ideal.

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k + [J]^{-1} \Delta\vec{g}_k$$

Para el sistema en consideración (Figura 1), el conjunto de ecuaciones iterativas empleando la técnica de GS resulta:

$$\begin{cases} V_2^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{22}}\left[\frac{P_2 - jQ_2}{\left[V_2^{(k)}\right]^*} - Y_{21}V_1 - Y_{23}V_3^{(k)}\right] \\ V_3^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{33}}\left[\frac{P_3 - jQ_3}{\left[V_3^{(k)}\right]^*} - Y_{31}V_1 - Y_{32}V_2^{(k+1)}\right] \end{cases}$$

La técnica iterativa de NR para el ejemplo en cuestión resulta:

$$\begin{bmatrix} |V_2^{(k+1)}| \\ |V_3^{(k+1)}| \\ \delta_2^{(k+1)} \\ \delta_3^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |V_2^{(k)}| \\ |V_3^{(k)}| \\ \delta_2^{(k)} \\ \delta_3^{(k)} \end{bmatrix} + [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix}$$

donde:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_2^{esp} - P_2^{calc(k)} \\ P_3^{esp} - P_3^{calc(k)} \\ Q_2^{esp} - Q_2^{calc(k)} \\ Q_3^{esp} - Q_3^{calc(k)} \end{bmatrix} \qquad [J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_3|} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} \\ \frac{\partial P_3}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_3}{\partial |V_3|} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_3|} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_3}{\partial |V_3|} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} \end{bmatrix}$$

III.2. Solución Clásica: *Ejemplo*

Se considera el sistema de prueba donde la Barra-1 es del tipo de compensación, con voltaje $1.05\angle 0° \, p.u$, y datos en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Datos de barras para el Sistema de Prueba

Barra	Tipo de Barra	P [p.u.]	Q [p.u.]
1	Slack		
2	Carga-1	0.95	0.43
3	Carga-2	0.55	0.45

Tabla 2. Datos elementos para el Sistema de Prueba

Barra	Barra	R[p.u.]	X[p.u]
1	2	0.012	0.24
1	3	0.015	0.45
2	3	0.0125	0.252

Se resolvió el flujo de potencia, empleando la técnica iterativa de NR, sin aceleración,

permitiendo un máximo error absoluto en potencias de 10^{-9}pu.

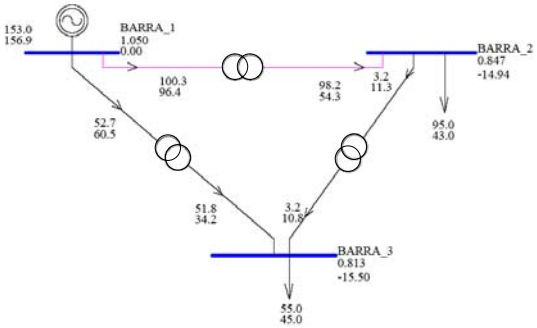


Tabla 2. Solución en la iteración 7 de N-R

Barra	Voltaje [p.u]	Angulo [grados]
1	1.0500000	0
2	0.8467997	-14.9382
3	0.8128413	-15.4951

III.3. Análisis de Sensibilidad: *Fundamentos*

El problema de flujo de potencia tradicional (4) debe ser modificado para incluir las estrategias de control, por lo que se divide el vector de variables independientes en : *el vector de parámetros* $\vec{\lambda}$, y el vector de variables de control $\vec{u}$. Resultando

$$\vec{g}(\vec{x},\vec{u},\vec{\lambda})=0 \qquad (4')$$

Para determinar el vector de estado ante una variación del vector de variables independientes, es apropiado el uso del *análisis de sensibilidad*. Esto puede ser logrado al expandir (4') en desarrollo de series de Taylor:

$$\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{x}}\Delta\vec{x}+\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{u}}\Delta\vec{u}+\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{\lambda}}\Delta\vec{\lambda}=0$$

Donde el cambio en la variable de estado es:

$$\Delta\vec{x}=-\left[\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{x}}\right]^{-1}\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{u}}\Delta\vec{u}-\left[\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{x}}\right]^{-1}\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{\lambda}}\Delta\vec{\lambda} \qquad (5)$$

Quedando definidas las *matrices de sensitividad de las variables de estado a las variables de control* (S_{xu}) y *a los parámetros* ($S_{x\lambda}$) respectivamente:

$$S_{xu}=\left[\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{x}}\right]^{-1}\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{u}}$$
$$S_{x\lambda}=\left[\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{x}}\right]^{-1}\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{\lambda}} \qquad (6)$$

donde $\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{x}}=[J]$, es la matriz, $2n\times 2n$, Jacobiana de la función de balances de potencia. Lo anterior permite el cálculo del cambio el vector de estado ante un cambio en el vector de parámetros:

$$\Delta\vec{x}=-S_{xu}\Delta\vec{\lambda} \qquad (7)$$

III.3. Análisis de Sensibilidad: *Ejemplo*

Considerando el sistema de prueba, la ecuación de equilibrio de potencias con respectivo vector de parámetros (no se considera variables de control:

$$\vec{g}(\vec{x},\vec{\lambda})=\begin{bmatrix} g_1(\vec{x},\vec{\lambda}) \\ g_2(\vec{x},\vec{\lambda}) \\ g_3(\vec{x},\vec{\lambda}) \end{bmatrix}$$

siendo su variación al vector de parámetros:

$$\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{\lambda}}=\begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial P_2} & \frac{\partial g_1}{\partial P_3} & \frac{\partial g_1}{\partial Q_2} & \frac{\partial g_1}{\partial Q_3} \\ \frac{\partial g_2}{\partial P_2} & \frac{\partial g_2}{\partial P_2} & \frac{\partial g_2}{\partial Q_2} & \frac{\partial g_2}{\partial Q_3} \\ \frac{\partial g_3}{\partial P_2} & \frac{\partial g_3}{\partial P_2} & \frac{\partial g_3}{\partial Q_2} & \frac{\partial g_3}{\partial Q_3} \\ \frac{\partial g_4}{\partial P_2} & \frac{\partial g_4}{\partial P_2} & \frac{\partial g_4}{\partial Q_2} & \frac{\partial g_4}{\partial Q_3} \end{bmatrix}; \quad \frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{\lambda}}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz de sensitividad de las variables de estado a los parámetros resulta:

$$S_{x\lambda}=\left[\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{x}}\right]^{-1}\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{\lambda}}=[J]^{-1}\times[I]$$

Considerando la solución obtenida en (III.2.), se logra:

$$S_{x\lambda}=\begin{bmatrix} 0.1349 & 0.1116 & 0.02892 & 0.02325 \\ 0.01092 & 0.1731 & 0.2226 & 0.4037 \\ 0.1747 & 0.1064 & -0.0125 & 0.0067 \\ 0.1012 & 0.2287 & 0.0039 & -0.0305 \end{bmatrix}$$

Si se considera un cambio en la demanda de la Barra-2, $\Delta P_2=0.1p.u, \Delta Q_2=0.05p.u$ el análisis de sensibilidad arroja que los cambios en el vector es estado serán:

$$\Delta\vec{x}=-S_{xu}\Delta\vec{\lambda}=-\begin{bmatrix} 0.0280 \\ 0.0220 \\ 0.0168 \\ 0.0103 \end{bmatrix}$$

Donde ante este cambio los voltajes en las barras

Tabla 3. Solución ante cambio en la demanda de Barra-2, por análisis de sensibilidad

Barra	Voltaje [p.u]	Angulo [grados]
1	1.0500000	0
2	0.8188	-15.9031
3	0.7908	-16.0867

El posterior análisis de flujo de potencia con NR, con la nueva demanda resulta:

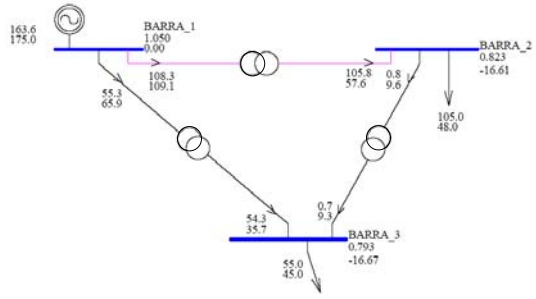


Tabla 4. Solución ante cambio en la demanda de Barra-2, por NR

Barra	Voltaje [p.u]	Angulo [grados]
1	1.0500000	0
2	0.8226	-16.6091
3	0.7930	-16.6697

III.4. Sensibilidad y Variables de Control: *Fundamentos*

Para considerar las variables de control, la ecuación de balance de potencia (4') las incluirá dentro del vector $\vec{u}$, y además se debe definir una función deseada $\vec{f}(\vec{x},\vec{u},\vec{\lambda})$ para las variables controladas. De nodo que el cambio en las variables a controlar con respecto al cambio en las variables de control $\Delta\vec{u}$, se obtiene del análisis de sensibilidad. Procediendo por el desarrollo de series de Taylor.

$$\frac{\partial\vec{f}}{\partial\vec{x}}\Delta\vec{x}+\frac{\partial\vec{f}}{\partial\vec{u}}\Delta\vec{u}+\frac{\partial\vec{f}}{\partial\vec{\lambda}}\Delta\vec{\lambda}=\Delta f$$

Se supone que no hay cambio respecto a los parámetros:

$$\Delta\vec{f}=\frac{\partial\vec{f}}{\partial\vec{x}}\Delta\vec{x}+\frac{\partial\vec{f}}{\partial\vec{u}}\Delta\vec{u}$$

Tomando las variaciones de la variable es estado de (5) y (6), se tiene:

$$\Delta\vec{f}=\left[-S_{xu}\Delta\vec{u}\right]F_x+F_u\Delta\vec{u}$$

$$\frac{\Delta\vec{f}}{\Delta\vec{u}}=-S_{xu}F_x+F_u \qquad (8)$$

Siendo S_{fu} la matriz de sensibilidad para las variables dependientes a las variables de control.

$$S_{fu}=-S_{xu}F_x+F_u$$

Si la sensibilidad $\frac{\Delta\vec{f}}{\Delta\vec{u}}$, se puede emplear (8) Para ajustar el cambio en la variable de control $\Delta\vec{u}$ y lograr un cambio deseado en la función $\vec{f}$.

$$\Delta f=-S_{fu}\Delta\vec{u} \qquad (9)$$

III.4. Ajuste de Tap por Sensibilidad: *Fundamentos y Ejemplo*

En el sistema de prueba, el transformador T23, se le agrega cambiador automático de tomas para controlar el voltaje de la barra 3, $|V_3|$ (ver Figura 2). La variable a controlar puede ser expresada en términos de la variable de estado, por lo que la función deseada resulta:

$$\vec{f}(\vec{x})=\begin{bmatrix}0\\|V_3|\\0\\0\end{bmatrix}$$

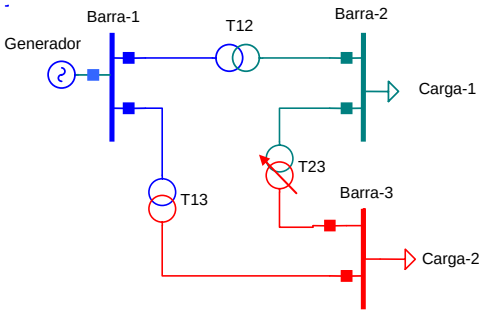
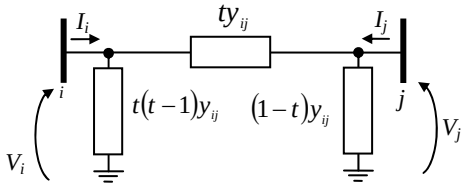


Figura 2. Sistema de prueba con Cambiador Automático de tomas

El valor del cambiador de tomas es la variable de control a considerar, $\vec{u}=[t_{23}]$, de modo que aplicando sensibilidad, respecto a la variables de control resulta:

$$S_{fu}=-\left[\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{x}}\right]^{-1}\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{u}}=[J]^{-1}\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{u}}F_x$$

Ahora bien, en el transformador con cambiador de tomas.



La potencia que fluye del nodo *i* al *j* es dado por:

$$P_{ij}=|V_i|^2t_{ij}^2g_{ij}-|V_i||V_j||y_{ij}|t_{ij}\cos(\delta_i-\delta_j-\theta_{ij})$$

$$Q_{ij}=-|V_i|^2t_{ij}^2g_{ij}+|V_i||V_j||y_{ij}|t_{ij}\sin(\delta_i-\delta_j-\theta_{pq})$$

Y el flujo de potencia en dirección opuesta *j* a *i*:

$$P_{ji}=|V_j|^2g_{ji}-|V_i||V_j||y_{ji}|t_{ji}\cos(\delta_j-\delta_i-\theta_{ji})$$

$$Q_{ji}=-|V_j|^2g_{ji}+|V_i||V_j||y_{ji}|t_{ji}\sin(\delta_j-\delta_i-\theta_{ji})$$

NOTA: y_{23}, es la admitancia del transformador T23 y no el elemento Y_{23} de la matriz admitancia.

La variación en el balance de potencia respecto al cambio al vector de variable de control puede ser fácilmente derivando de las anteriores ecuaciones de potencia en el transformador respecto a la variable de control t_{23}.

$$\frac{\partial\vec{g}}{\partial\vec{u}}=\frac{\partial\vec{g}}{\partial t_{23}}=\begin{bmatrix}\frac{\partial P_2^{Total}}{\partial t_{23}}\\\frac{\partial P_3^{Total}}{\partial t_{23}}\\\frac{\partial Q_2^{Total}}{\partial t_{23}}\\\frac{\partial Q_3^{Total}}{\partial t_{23}}\end{bmatrix} \quad \text{donde:} \quad \begin{aligned}P_i^{Total}&=P_i^{esp}-P_i^{calc}\\Q_i^{Total}&=Q_i^{esp}-Q_i^{calc}\end{aligned}$$

de modo que resulta:

$$\frac{\partial \vec{g}}{\partial \vec{u}} = \begin{bmatrix} -2t_{23}|V_2|^2 g_{23} + |V_2||V_3||y_{23}|t_{23}\cos(\delta_2 - \delta_3 - \theta_{23}) \\ |V_2||V_3||y_{23}|\cos(\delta_3 - \delta_2 - \theta_{32}) \\ 2t_{23}|V_2|^2 b_{23} + |V_2||V_3||y_{23}|sen(\delta_2 - \delta_3 - \theta_{23}) \\ |V_2||V_3||y_{23}|sen(\delta_3 - \delta_2 - \theta_{32}) \end{bmatrix}$$

La variación de la función deseada respecto a la variable a la variable de estado, queda:

$$\frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{x}} = F_x = \begin{bmatrix} \frac{\partial \vec{f}}{\partial |V_2|} & \frac{\partial \vec{f}}{\partial |V_3|} & \frac{\partial \vec{f}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \vec{f}}{\partial \delta_3} \end{bmatrix}$$

$$F_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Por su parte, la variación de la función desea respecto al vector de variable de control, resulta nulo.

$$\frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{u}} = F_u = \frac{\partial \vec{f}}{\partial t_{23}} = 0$$

Si inicialmente se considera el cambiador de tomas del transformador $u = t_{23}$, se encuentra fijo en 0.95 p.u. la solución del flujo de potencia por NR resulta:

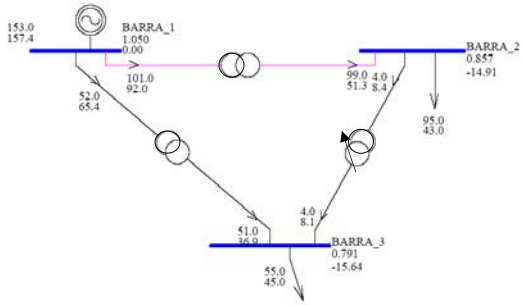


Tabla 5. Solución por NR con tap fijo

Barra	Voltaje [p.u]	Angulo [grados]
1	1.0500000	0
2	0.8573	-14.9055
3	0.7908	-15.6393

La sensibilidad de la función deseada $f = V_3$, respecto a la variable de control puede ser calculada:

$$\frac{\Delta \vec{f}}{\Delta \vec{u}} = -[J]^{-1} \frac{\partial \vec{g}}{\partial \vec{u}} F_x$$

Donde el inverso de la matriz del Jacobiano es:

$$[J]^{-1} = \begin{bmatrix} 0.1356 & 0.1153 & 0.2913 & 0.2390 \\ 0.1056 & 0.1713 & 0.2202 & 0.3961 \\ 0.1753 & 0.1094 & -0.0125 & 0.0063 \\ 0.1000 & 0.2287 & 0.0036 & -0.0301 \end{bmatrix}$$

Mientras que la variación del balance de potencia respecto a la variable de control es:

$$\frac{\partial \vec{g}}{\partial \vec{u}} = \frac{\partial \vec{g}}{\partial t_{23}} = \begin{bmatrix} -0.17913 \\ 0.17044 \\ 2.85302 \\ 2.67793 \end{bmatrix}$$

siendo el valor de la sensibilidad:

$$\frac{\Delta \vec{f}}{\Delta \vec{u}} = \frac{\Delta |V_3|}{\Delta t_{23}} = -0.42868779299558\, p.u$$

Debido a que el valor de $|V_3| = 0.78923915\, p.u.$ está fuera del rango especificado (limite interior en la barra 3, 0.75 *p.u.*), entonces la variación deseada es: $\Delta |V_3|^{deseado} = -0.039239150\, p.u.$. Esta corrección para el voltaje controlado, requiere un cambio en la variable de control, la posición del tap.

$$\Delta \vec{u} = \frac{\Delta \vec{f}}{\left(\frac{\Delta |V_3|}{\Delta t_{23}}\right)} = \frac{-0.03923}{-0.42868} = 0.091533\, p.u.$$

Así que la posición del cambiador de toma que garantiza el cumplimiento de la restricción del voltaje en la barra 3 es:

$$t_{23} = 1.14416\, p.u.$$

Es decir un tap que permita -12.6%. La solución por NR a la nueva posición del tap indica:

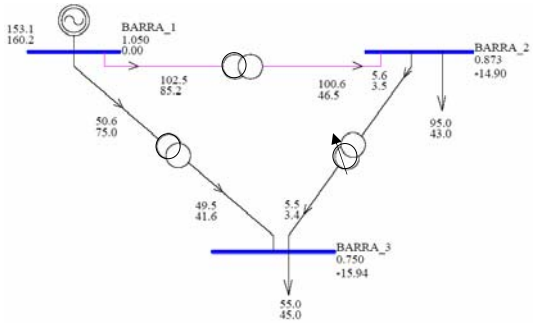


Tabla 6. Solución por NR con ajuste del tap

Barra	Voltaje [p.u]	Angulo [grados]
1	1.0500000	0
2	0.8728351	-14.8489
3	0.7500072	-16.0877

IV. Conclusiones

Las estrategias de control y sus variables modifican el proceso de resolución de flujo de potencia tradicional, debiéndose emplear las iteraciones de ajuste, además de las técnicas tradicionales, en este documento, se uso análisis de sensibilidad para el ajuste automático de cambiador de toma de transformador, resultando un método muy rápido de calculo y que demuestra una rápida convergencia.

VI. Trabajos Futuros

- Efectuar la prueba con sistemas de mayor tamaño.
- Estudiar las interacciones los esquemas de control y su mecanismo de sobrellevarlos.

VII. Referencias Documentales

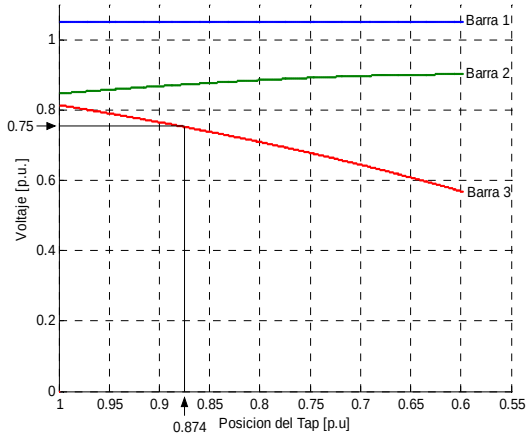
[1] Maria G., Yuen A., Findlay J. Control Variable in Load Flows.

[2] S. K. Chang, V. Brandwajn: ”Adjusted Solutions in Fast Decoupled Load Flow”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 3, No. 2, May 1998.

[3] Marti, Jose (1975). *Análisis de Sistemas de Potencia: Estudio de Flujo de Carga en Sistemas de Potencia.* Universidad Central de Venezuela

[4] Stevenson W., Grainger J. (1996). *Análisis de Sistemas de Potencia*. Mc Graw Hill

[5] Nedic D. Tap Adjusting in AC Load Flow. UMIST, Sept 2002

VIII. Anexo

Para observar el comportamiento del voltaje en las barras del sistema ante las variaciones del tap, se procedió a implementar una grafica donde se muestra las soluciones de voltajes para flujo de potencia antes posiciones de tap entre0.5 y 1 *p.u*.