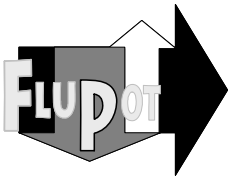
Reporte de Investigación
2007-18

Flujo de Potencia considerando Modelo de Máquinas de Inducción: FluPot

Responsables: Carlos Ornelas
William Marchena
Enrique Garvoskis

Supervisor: Frednides Guillen
Francisco M. González-Longatt

Línea de Investigación:
Fuentes Alternas de Energía
y
Generación Distribuida



Junio-2007

Motivación

Cuando de efectúa el calculo de flujo de potencia en un sistema de potencia y se incluye máquinas de inducción, se esta interesado en el valor de las variables del sistema, en condiciones de régimen estacionario; pero tradicionalmente, en estos estudios se simplifica de sobremanera el comportamiento real de la máquina, y en estudios muy simplificados no se considera la dependencia del voltaje en este tipo de cargas.

Sin embargo, la integración de novedosas fuentes de energía, como el caso de aerogeneradores con turbinas de viento a velocidad constante, ha impulsado el uso cada vez en mayor cantidad de la máquina de inducción directamente acompaña a la red operando como generador. Y cada día son necesario estudios más detallados a fin de evaluar en forma más exacta el comportamiento más completo de esta máquina. En tal sentido, al programa de calculo de flujo de potencia tradicional denominado Flupot, se le han desarrollado dos rutinas para incorporar modelos más ajustados a la realidad del desempeño de la máquina de inducción.

El presente reporte de investigación tiene como objetivo evaluar la efectividad de los resultados logrados en el estudio de flujo de potencia en un sistema de potencia considerando la integración de máquina de inducción de simple jaula de ardilla.

Inicialmente se muestra la metodología implementada para tomar en consideración el comportamiento de la máquina de inducción, basados en el modelo de régimen estacionario de Steinmetz. Luego, estas metodologías fueron implementadas dentro del programa Flupot. Simulaciones fueron efectuadas sobre una red de prueba, integrando máquinas de inducción operando como generador; y los resultados obtenidos son contrastados con los logrados con un programa comercial reconocido.

Modelación de la Máquina de Inducción

Partiendo de conocida la topología y los parámetros de la red, el flujo de potencia tradicional persigue establecer el valor de las variables eléctricas desconocidas típicamente: voltajes de barra (magnitud y ángulo), potencias a través de los enlaces o uniones, potencias generadas y consumidas, y pérdidas de potencia activa y reactiva.

Tradicionalmente las máquinas de inducción eran consideradas como una carga más dentro del análisis de flujo de potencia y como tal, tratadas como una barra de carga *PQ* constante.

Sin embargo, el creciente interés por el uso de fuentes alternas de energía ha avivado el uso de la máquina de inducción como generador, y ha surgido nuevos intereses al evaluar el desempeño de este tipo de unidad. En tal sentido, modelos más refinados han sido incluidos en el análisis de flujo de potencia, a fin de considerar de un modo más realista el comportamiento de la máquina de inducción. A continuación se detalla dos posibles formas de modelación: Modelo *PQ* y Modelo *RX*.

REPORTE

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

Modelo PQ

Una manera de modelar una marquina de inducción en el estudio de flujo de potencia, es por medio del clasico modelo de una barra *PQ*, donde se asume una potencia activa generada (P_T) y un factor de potencia dado (cos ϕ), con los cuales se calcula la potencia reactiva consumida (Q_T) [1].

Algunas mejoras en esta modelación puede ser alcanzadas si el modelo de estado estacionario de la máquina de inducción es tomado en cuenta (Figura 1). En el modelo mostrado se ha despreciado la resistencia de la rama de magnetización ($R_m = \infty$):

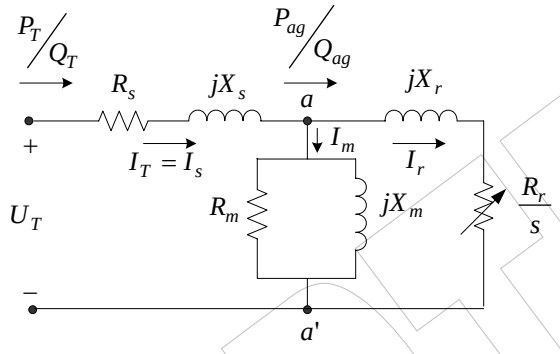


Figura 1. Circuito Equivalente de una Máquina de Inducción Trifásica. En Secuencia Positiva bajo Operación Balanceada de Régimen Estacionario

En este modelo presentado en la Figura 1, la aplicación de la conservación del teorema complejo de la potencia (teorema de Boucherot) permite que la sea escrita en forma compacta una expression para la potencia reactiva consumida por la máquina (el signo positive ha sico considerado cuando la máquina está consumiendo) [1]:

$$Q_T = \left(\frac{(U_T)^2}{(R_s + R_{eq})^2 + (X_s + X_{eq})^2} \right) \left[X_s + \left[\frac{X_{eq}^2 + R_{eq}^2}{X_m} \right] + \left(\frac{X_{eq}^2 + R_{eq}^2}{\left[\left(\frac{R_r}{s} \right)^2 + X_r^2 \right]^2} \right) \right] \quad (1)$$

Donde R_{eq} y X_{eq} son la resistencia equivalente y reactancia equivalente respectivamente obtenidas en el circuito de la Figura 2.

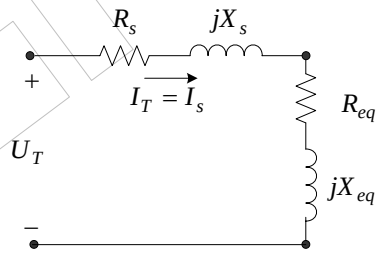


Figura 2. Circuito Equivalente de Thevenin Visto desde la Rama de Magnetización para el Modelo de una Máquina de Inducción

Se tratará en conjunto ambos circuitos.

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}$$

$$R_{eq} = \mathrm{Re}\left\{ jX_m \left\| \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) + jX_r \right] \right. \right\} = \frac{X_m^2 \left(\frac{R_r}{s} \right)}{\left(\frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_r + X_m)^2} \quad (2)$$

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

$$X_{eq} = \mathrm{Im}\left\{ jX_m \left\| \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) + jX_r \right] \right. \right\} = \frac{X_m \left[X_r (X_r + X_m) + \left(\frac{R_r}{s} \right)^2 \right]}{\left[\left(\frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_r + X_m)^2 \right]} \quad (3)$$

Es importante mencionar que en este problema, se conoce como entrada al mismo, la potencia mecánica aplicada a en el eje de la marquina (P_{mec}), al igual que las condiciones de voltaje en terminales (U_T).

Modelo RX

Una forma de considerar en el flujo de potencia el modelo de la marquina de inducción es considerarla como una barra *RX*, después de los tres pasos siguientes [1], [2]:

1) Conocida la potencia mecánica (P_{mec}) en el eje de la máquina de inducción.
2) Calcular la potencia eléctrica (P_T) que cada máquina de inducción puede entregar, según los resultados del análisis de flujo de potencia dado en el paso anterior.
3) Comparar ambas potencias y buscar el valor del deslizamiento (s), para el cual las potencias eléctricas (P_T) y mecánicas coinciden (P_{mec}), para la potencia mecánica dada.

El modelo de RX se basa en el modelo de estado estacionario de la máquina de inducción, donde se representa por medio del circuito de la Figura 1, la rama magnetizante está situada entre el estator y el rotor, que es una aproximación mejor a la máquina real.

Una manera "*inexacta*" del funcionamiento puede ser fijar la potencia mecánica P_{mec} y asumir que el deslizamiento (s) se puede calcular de la ecuación siguiente:

$$s = \frac{-\left(2R_{th}R_r P_{mec} - R_r U_{th}^2\right) - \sqrt{-R_r^2\left(4R_{th}P_{mec}U_{th}^2 - U_{th}^4 + 4P_{mec}^2(X_{th}+X_r)^2 + 4R_r U_{th}^2 P_{mec}\right)}}{2\left(R_{th}^2 P_{mec} + P_{sh}(X_{th}+X_r)^2 + R_r U_{th}^2\right)} \quad (4)$$

Donde R_{th}, X_{th} y U_{th} son la resistencia, reactancia y la tensión equivalente respectivamente obtenidas a través de la aplicación del teorema de Thevenin en el circuito de la Figura 2.

Esta ecuación es obtenida, basado en el modelo de estado estacionario de la máquina, aplicando el teorema de Boucherot y además se asume que la resistencia del estator despreciable.

El proceso iterativo consiste en el siguiente: un valor inicial del deslizamiento es considerado al principio del proceso (s^0), un valor conveniente de que es el deslizamiento clasificado de la máquina, o del valor obtenido a partir de la ecuación (4).

Con los resultados obtenidos, la energía mecánica de la máquina se puede calcular como:

$$P_{mec}^{calc} = -I_r^2 R_r \frac{(1-s)}{s}$$

donde I_r es el valor rms de la corriente del rotor, calculada por el circuito equivalente correspondiente.

Cuando el valor de esta potencia mecánica calculada (P_{mec}^{calc}) con coincide con el valor de la potencia mecanica aplicada en el eje de la máquina (P_{mec}), entonces se comienza un proceso de convergencia de estos valores.

En este caso, se modifica el deslizamiento:

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

$$s^{(k+1)} = s^{(k)} + \Delta s \quad (5)$$

donde el actual deslizamiento s_k y el nuevo deslizamiento s_{k+1} (deslizamiento que se debe considerado en el análisis de flujo de potencia siguiente), respectivamente, y de allí se puede observar el siguiente vector:

$$\mathbf{\Delta s} = \mathbf{J}^{-1}\mathbf{\Delta P}_{mec} \quad (6)$$

Donde $\Delta P_{mec}^{(k+1)} = \Delta P_{meci}^{(k)} - \Delta P_{mec}^{(k+1)}$ en donde $\Delta P_{mech}^{(k)}$ es la variación de potencia mecánica actual de cada máquina asincrónica y $\Delta P_{mec}^{(k+1)}$ es la variación de potencia mecánica nueva de cada máquina asincrónica.

Si la aproximación ((1 - *s*)/s) = (1/s) se asume en la proximidad del punto de trabajo, *J* se puede calcular como:

$$J^{-1} = \frac{\left[\left[R_{th}{}^2 + \left(X_{th} + X_r\right)^2\right]s^2 + 2R_{th}R_r s + R_r{}^2\right]^2}{U_{th}{}^2 R_r\left[\left[R_{th}{}^2 + 2R_{th}R_r + \left(X_{th} + X_r\right)^2\right]s^2 + 2R_r{}^2 s - R_r{}^2\right]} \quad (7)$$

Con los nuevos valores de $s^{(k)}$ y de J^{-1}, se repite el análisis de flujo de potencia, y los finales de proceso cuando la potencia mecánica, P_{mec}, y la potencia en terminales (P_T) son iguales, o la diferencia entre ambas es aceptable.

Se calcula este error de P_{mec} como $\sum_{k=1}^{n}(P_{mec}^{(k)} - P_T^{(k)})^2$, donde está el número *n* de máquinas de inducción.

El algoritmo realizado para simular la granja de viento como barra *RX* está como sigue a continuación:

1) Comenzar con $s^0 = s_{nom}$ en cada máquina de deslizamiento. Con éste valor, se calcula la impedancia de la máquina de inducción Z_{mi}.
2) Con éstos valores, se modela la máquina de inducción como una barra *RX* incluyendo las admitancias de las máquinas en la matriz admitancia de barra y en los términos correspondientes al Jacobiano.
3) Como resultado del primer flujo de potencia, los voltajes en las barras pueden ser obtenidos. Con éstos, se calcula la potencia mecánica P_{mec} de la máquina máquina de inducción con la expresión $P_{mec} = -I_r^2 R_r(1-s)/s$, luego se comparan ambas potencias y, si no son iguales, no se recalcula *s* por medio de (5) sino se va al paso 2. Si son iguales, el algoritmo acaba.

Características de Convergencia entre los Modelos PQ y RX

La ventaja del modelo de *PQ* es que la potencia real está calculada como una función de la velocidad del viento para la primera iteración del análisis de flujo de potencia, y entonces su valor permanece como constante

La potencia reactiva depende de la potencia real y del voltaje de barra. Puesto que la potencia activa es asumida constante, la única variable es el voltaje de barra. Hay dos posibilidades de calcular la potencia reactiva:

- La primera de ellas consiste en considerar el voltaje como un valor constante. En este caso sigue habiendo las potencias activas y reactivas especificadas se saben en la primera iteración y sin cambiar. La barra se comporta como una barra convencional de *PQ*. Con esta simplificación el error no es significativo.
- La segunda manera consiste en el calcular la potencia reactiva en función del voltaje. En este caso el valor de la potencia reactiva específica se debe poner al día en cada iteración. De cualquier manera, las características de la convergencia cuando se utiliza el modelo de la barra *PQ* es similar al caso del modelo convencional de *PQ*.

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

Cuando se utiliza el modelo de *RX,* hay dos procesos iterativos. Uno de ellos es debido al análisis de flujo de potencia y el otro al cálculo del deslizamiento del generador asincrónico. Desde el punto de vista del análisis de flujo de potencia, la barra *RX* se comporta como una barra *PQ*, donde son cero las potencias reales y reactivas. Debido a esto, no hay iteraciones adicionales del flujo de potencia que sean necesarias. Sin embargo, la obtención del deslizamiento final implica generalmente entre 2 y 6 iteraciones.

Datos y Consideraciones

Se ha considerado una red de prueba que consiste en un alimentados de distribución de Kumamoto en el área metropolitana de Japón, la cual puede ser vista en la Figura 2, esta es un típico circuito de distribución, de medio voltaje con un total de quince barras, catorce de ellas con carga. Los datos completos de la red pueden ser encontrados en [3].

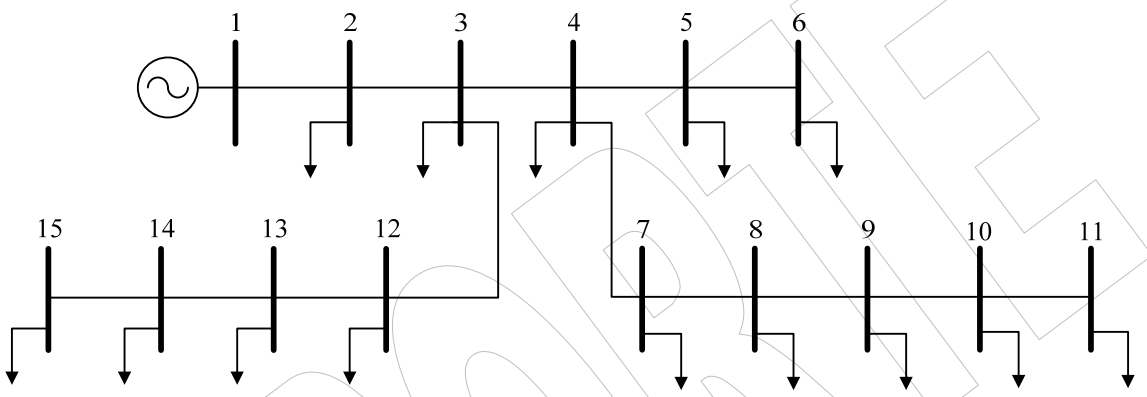


Figura 2. Red de Prueba: Sistema de Distribución de Kumamoto [3].

Tabla 1. Datos de Líneas y Cargas del Sistema de Distribución de Kumamoto [3].

Rama	*Nodo Inicio*	*Nodo Final*	*R [p.u.]*	*X [p.u.]*	*B [p.u]*	P_{load}	Q_{load}
1	1	2	0.003145	0.075207	0.00000	0.02080	0.0021
2	2	3	0.000330	0.001849	0.00150	0.04950	0.0051
3	3	4	0.006667	0.030808	0.03525	0.09580	0.0098
4	4	5	0.005785	0.014949	0.00250	0.04420	0.0045
5	5	6	0.014141	0.036547	0.00000	0.01130	0.0012
6	4	7	0.008001	0.036961	0.03120	0.06380	0.0066
7	7	8	0.008999	0.041575	0.00000	0.03230	0.0033
8	8	9	0.007000	0.032346	0.00150	0.02130	0.0022
9	9	10	0.003666	0.016940	0.00350	0.02800	0.0029
10	10	11	0.008999	0.041575	0.00200	0.21700	0.0022
11	3	12	0.027502	0.127043	0.00000	0.01320	0.0014
12	12	13	0.031497	0.081405	0.00000	0.00290	0.0003
13	13	14	0.039653	0.102984	0.00000	0.01610	0.0016
14	14	15	0.016070	0.004153	0.00000	0.01390	0.0014

Bases: V_{base}: 11.432 kV; S_{base}: 30MVA

Para consideraciones de éste reporte de investigación se ha tomado una máquina de inducción de aplicación típica en fuentes alternas de generación de electricidad.

Se ha considerado un generador de inducción trifásico de 350 kVA, 660V, cuyos datos característicos se muestran en la Tabla 2. Se trata de un generador de inducción de jaula simple de ardilla, característico de aerogeneradores impulsado por turbina de viento de velocidad constante.

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

Tabla 2. Datos de la Máquina de Inducción 350 kVA, 660 V [4]

Símbolo	*Descripción*	*Valor*
V_{nom}	Voltaje Nominal	0.66 kV
S_{nom}	Potencia Nominal	350 kVA
R_s	Resistencia del Estator	0.00571 p.u
R_r	Resistencia del Rotor.	0.00612 p.u
X_r	Reactancia del Rotor	0.06390 p.u
X_s	Reactancia del Estator	0.18780 p.u
X_m	Reactancia Magnetizante.	2.78000 p.u
H	Constante de Inercia	3.02500 s

Estos generadores han sido conectados en cada una de las barras de carga asociadas a la red de prueba, a través de un transformador elevador, cuyos parámetros se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos del Transformador Elevador 2.5 MVA, 11.432/0.66 kV

Símbolo	*Descripción*	*Valor*
V_{nom2}/V_{nom1}	Relación de Transformación	11.432/ 0.66 kV
S_{nom}	Potencia Nominal	2500 kVA
Z_t	Impedancia	0.0575 p.u
X_t/R_r	Relación X/R	8

Al agregar los transformadores elevadores asociados a cada máquina de inducción, se deben incluir 14 barras más que corresponden al lado de baja tensión de los transformadores y donde se efectúa la conexión de las máquinas.

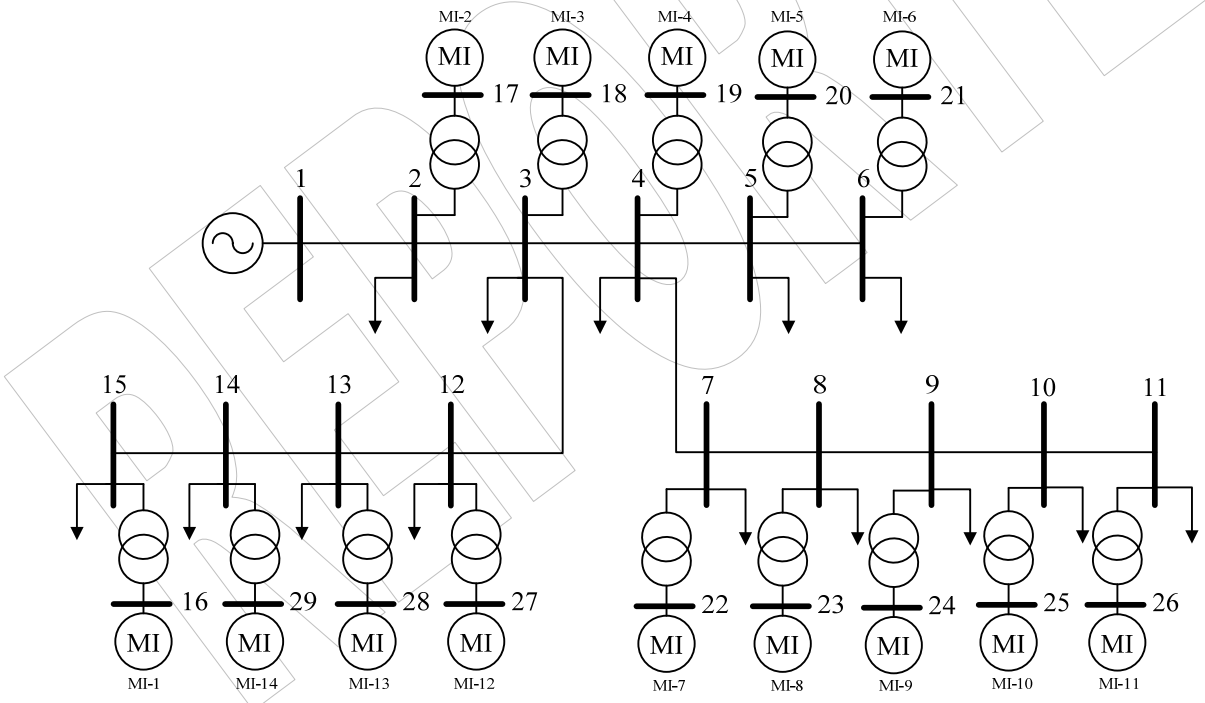


Figura 3. Red de Prueba Incluyendo la Integración de las Máquinas de Inducción

Se ha tomando como referencia la red de prueba de Kumamoto, para desarrollar la validación y verificación de los resultados arrojados por la herramienta computacional Flupot; la cual fue implementada en Matlab™, y resuelve las ecuaciones de flujo de potencia en formulación polar, mediante la técnica iterativa de Newton Rasphson.

Flupot ha sido modificado para incluir rutinas para la simulación de la máquina de inducción: Modelo *PQ* y *RX*. Para consideraciones de este reporte se han considerado las 14 máquinas de inducción operando como generador a un 70% de su potencia nominal en el eje (P_{mec} = 0.7 p.u), y solo se han efectuado simulaciones con el modelo *RX*.

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

Los resultados obtenidos con el programa Flupot son comparados con los logrados con una herramienta computacional comercial reconocida y que por lo tanto puede ser considerado como patrón. El programa comercial ETAP PowerStation versión 5.0, de la empresa *Operation Technologies* Inc. ha sido tomado como el mencionado patrón.

Para todas las simulaciones se ha considerado una tolerancia para el máximo error de potencia de 10^{-6} p.u, y se ha colocado como restricciones no superar las 99 iteraciones.

Simulación y Resultados

El programa ETAP PowerStation versión 5.0, permite la modelación en el flujo de potencia de las máquinas de inducción. Este programa requiere que sean entrados una serie de datos como lo son: potencia mecanica nominal, voltaje nominal, corriente a plena carga, y además especificar la eficiencia y el factor de potencia de la marquina para una serie de puntos operativos, 50%, 75% y 100% de carga.

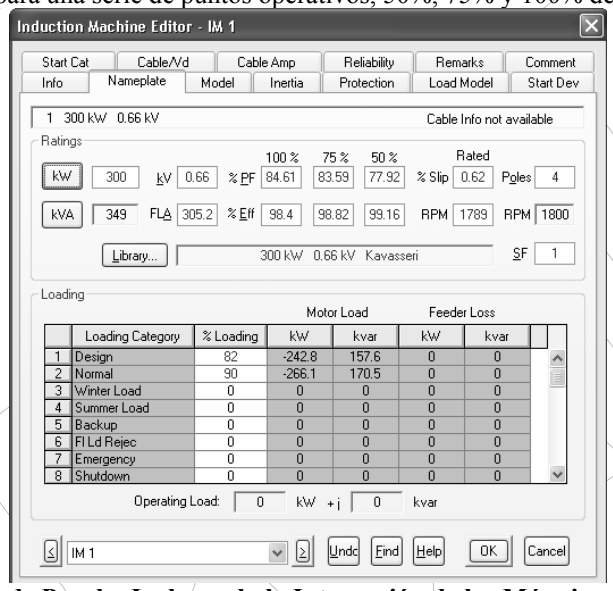


Figura 4. Red de Prueba Incluyendo la Integración de las Máquinas de Inducción

Haciendo uso del programa CurvasREMI, se procedió a estimar en régimen estacionario los puntos de operación de la marquina y los cuales se relacionen en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4. Puntos Característicos de Operación como MOTOR para la Máquina de Inducción 350 kVA, 660 V

P_{mec} [p.u]	s [p.u]	Te [p.u]	P_{elec} [p.u]	Q_{elec} [p.u]	FP [%]	η [%]	$Velocidad$ [rpm]
1.00	7.77105e-3	1.00783	1.01607	0.63995	84.615	98.418	1786.01
0.75	5.55785e-3	0.75419	0.75890	0.49829	83.591	98.827	1790.00
0.50	3.5898e-3	0.50180	0.50419	0.40560	77.917	99.168	1793.54
0.25	1.7601e-3	0.25044	0.25151	0.35326	58.000	99.399	1796.83

Tabla 5. Puntos Característicos de Operación como GENERADOR para la Máquina de Inducción 350 kVA, 660 V

P_{mec} [p.u]	s [p.u]	Te [p.u]	P_{elec} [p.u]	Q_{elec} [p.u]	FP [%]	η [%]	$Velocidad$ [rpm]
1.00	-7.42574e-3	-0.99263	-0.98483	0.62959	-84.254	98.483	1813.37
0.75	-5.38933e-3	-0.74598	-0.74143	0.49735	-83.046	98.885	1809.70
0.50	-3.52134e-3	-0.49285	-0.49589	0.40761	-77.252	99.178	1806.34
0.25	-1.74383e-3	-0.24956	-0.24849	0.35496	-57.349	99.396	1803.14

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

A manera ilustrativa de considerar los valores de las variables en el punto operativo de interés correspondiente a P_{mec} = 0.7 p.u, mediante el programa computacional CurvasREMI, se logró los siguientes resultados:

s = 5.00522e-3 p.u = 0.500522%
T_{elec} = -0.69651 p.u = 1293.292075 New-m
P_{elec} = 0.69248 p.u = 244.368 kW
Q_{elec} = 0.47623 p.u = 166.6805 kVAr
cos ϕ = 82.396%
η = 83.290 %
ω_{mec} = 1809.01 rpm

Con los datos de la máquina de inducción incluidos dentro del modelo de la maquina considerado por el programa patrón se procedió a simular el flujo de potencia; en la Figura 5.

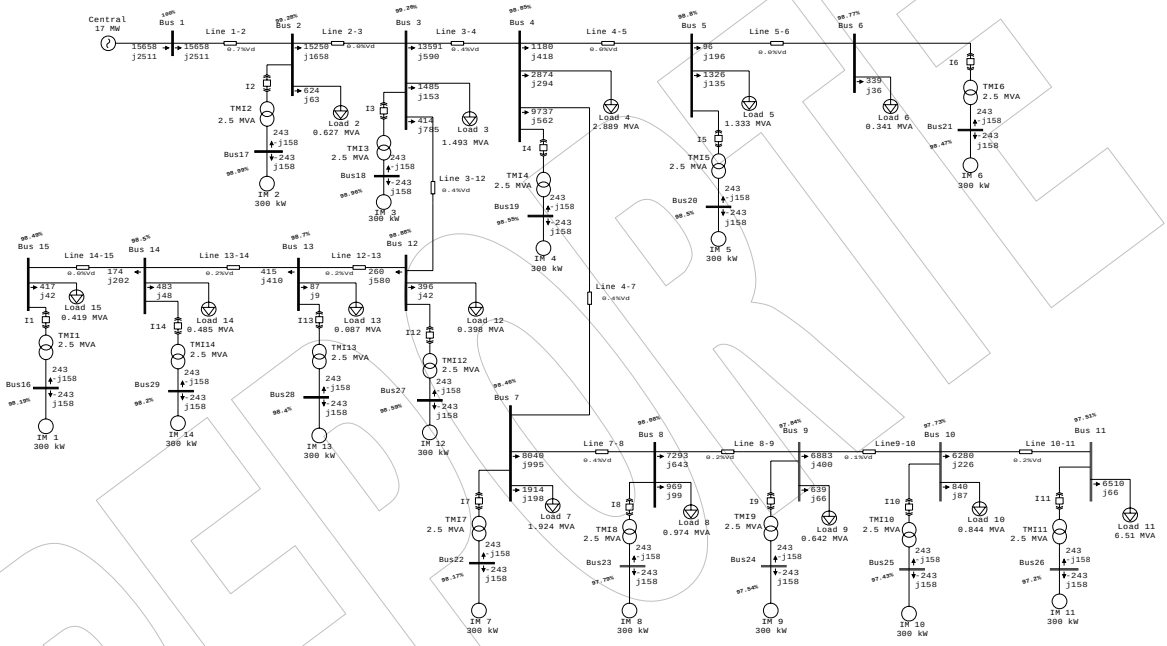


Figura 5. Resultados del Flujo de Potencia con el Programa Patrón

Por otra parte, se procedió a simular en el programa Flupot, la red de prueba considerada con las condiciones antes mencionadas. En la Figura 6, se muestra parte del reporte de resultados aportados por el programa Flupot.

Es importante mencionar que debido a que en la simulación de ha incluido el modelo en régimen estacionario de la máquina de inducción mediante el Modelo *RX*. Este método permite que además de entregar la solución del flujo de potencia tradicional, entregar como resultado el deslizamiento al cual esta operando la máquina en las condiciones de flujo de potencia considerados.

El programa Flupot, entrega un reporte particular para cada máquina de inducción considerada en la simulación, donde entrega los valores de las principales variables operativas de la máquina, incluyendo la potencia en terminales, y el deslizamiento (ver Figura 7).

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

```
                                    Programa de Flujo de Potencia
                                        FluPOT Versión 1.02
                                ------------------------------------------------------------
                                          ******* RESUMEN *******
Archivo: Red_De_Kumamoto_GI.xls
Fecha: 5/3/2007
Caso: Ejemplo de la Red de Kumamoto con GI 350 kVA, 660V
Año: 2006
Propietario: Marchena Williams; Ornelas Carlos
          Base del Sistema: 30 MVA
          Número de Barras: 29
          Número de Enlaces: 28
       Resumen de Maquinas:
          Número de Maquinas de Inducción: 14
          Número de Maquinas de Sincrónicas: 0
          Estudio: Flujo de Potencia
       Consideraciones para el flujo de potencia:
             Tolerancia del Error: 0.00001
             Numero Máximo de Iteraciones: 99
             Numero Máximo Iteraciones de Control: 10
             Paso de Tiempo: 0.00100 seg

       Maquinas de Inducción Consideradas por el método RX
    ------------------------------------------------------------
          ******* Resumen de Maquinas de Inducción *******
     ------------------------------------------------------------
      Maq.   Barra               Tipo          Pn [MW]      Vn [kV]
     ------------------------------------------------------------------
       1    16        Generador Inducción     0.30000       0.66000
       2    17        Generador Inducción     0.30000       0.66000
       3    18        Generador Inducción     0.30000       0.66000
       4    19        Generador Inducción     0.30000       0.66000
       5    20        Generador Inducción     0.30000       0.66000
       6    21        Generador Inducción     0.30000       0.66000
       7    22        Generador Inducción     0.30000       0.66000
       8    23        Generador Inducción     0.30000       0.66000
       9    24        Generador Inducción     0.30000       0.66000
       10   25        Generador Inducción     0.30000       0.66000
       11   26        Generador Inducción     0.30000       0.66000
       12   27        Generador Inducción     0.30000       0.66000
       13   28        Generador Inducción     0.30000       0.66000
       14   29        Generador Inducción     0.30000       0.66000
    ------------------------------------------------------------------
     Potencias Generadas por Maquinas Sincrónicas
    ------------------------------------------------------------------
     Barra: 1  Pgen: 0.521066 p.u Qgen: 0.0816083 p.u

     Perdidas Totales del Sistema P: -3.27102 MW   Q: 1.11025 MVAr

     Voltajes de Barra [p.u]
    ------------------------------------------------------------------
          Bus       V [p.u]    Ang [grados]
          1       1.0000      0.00000
          2       0.9930      -2.24692
          3       0.9927      -2.30043
          4       0.9887      -3.10041
          5       0.9882      -3.12973
          6       0.9879      -3.13119
          7       0.9849      -3.79006
          8       0.9811      -4.43278
          9       0.9787      -4.89259
          10       0.9776      -5.12201
          11       0.9754      -5.64032
          12       0.9891      -2.35987
          13       0.9872      -2.36544
          14       0.9853      -2.41739
          15       0.9852      -2.41255
          16       0.9725      -5.27687
          17       0.9858      -2.74635
          18       0.9820      -3.43337
          19       0.9898      -1.94916
          20       0.9853      -2.77537
          21       0.9782      -4.07345
          22       0.9747      -4.76017
          23       0.9758      -4.53154
          24       0.9901      -1.89584
          25       0.9824      -2.06098
          26       0.9823      -2.05607
          27       0.9862      -2.00609
          28       0.9851      -2.77663
          29       0.9844      -2.01040
       Número de Iteraciones: 5
      Tiempo Empleado en Load Flow: 2.35338 seg
```

Figura 6. Reporte de Resultados del Flujo de Potencia con el Programa FluPot

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

Resultados en las Máquinas de Inducción

Maquina	Barra	Pt [MW]	Qt [MVAR]	s [p.u]
1	16	-0.24464	0.15201	-0.00534
2	17	-0.24463	0.15404	-0.00519
3	18	-0.24463	0.15345	-0.00523
4	19	-0.24463	0.15467	-0.00514
5	20	-0.24463	0.15397	-0.00519
6	21	-0.24464	0.15288	-0.00528
7	22	-0.24464	0.15235	-0.00532
8	23	-0.24464	0.15251	-0.00530
9	24	-0.24463	0.15472	-0.00514
10	25	-0.24463	0.15351	-0.00523
11	26	-0.24463	0.15350	-0.00523
12	27	-0.24463	0.15410	-0.00518
13	28	-0.24463	0.15392	-0.00520
14	29	-0.24463	0.15382	-0.00521

Figura 7. Reporte de Resultados del Flujo de Potencia en las Máquinas de Inducción con el Programa FluPot

Se puede observar que las potencia en terminales de todas las máquinas de inducción consideradas aparecen con signo negativo, lo que indica que se esta entregando potencia a la red, mientras que la potencia reactiva resulta positiva debido a que la máquina de inducción para operar en modo de generación requiere consumir potencia reactiva. De igual modo, el deslizamiento resulta negativo, porque para poder generar, la máquina de inducción debe girar por encima de la velocidad sincrónica.

En la Figura 8, se dejan claro los sentidos de referencias asociados a las variables de la máquina de inducción considerada en el programa FluPot.

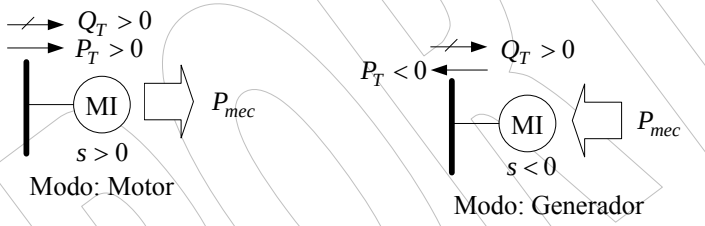


Figura 8. Convención Adoptada para las Variables de la máquina de inducción en el Programa FluPot, para modos de operación

REPORTE

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

Comparación de Resultados

Una vez efectuadas simulaciones con el programa FluPot y con el programa tomado como patrón, se procede a efectuar un contraste de los resultados.

Inicialmente se debe dejar claro que los métodos empleados por ambos programas difieren en gran forma. Mientras en el programa Flupot se ha desarrollado los modelos *RX* y *PQ*, para considerar el desempeño real en régimen estacionario de la máquina de inducción, en el programa empleado como patrón, se emplea una modelación tan solo basado en una interpolación de unos puntos operativos introducidos en forma de tabla.

De hecho en el programa patrón, se introducen el valor del factor de potencia (cos ϕ) y de la eficiencia (η), para tres puntos posibles de carga: 50%, 75% y 100%. A partir de estos puntos, cuando se define una cierto punto de operación en la máquina de inducción el programa efectúa una interpolación y ajusta el valor de la potencia activa y reactiva en terminales; estos valores son especificados para la barra y se modela con el tradicional desempeño de barra *PQ*.

Para la simulación efectuada sobre la red de prueba, se ha supuesto todas las máquinas de inducción operando como generador, y donde se ha supuesto que todas las máquinas se le aplica el mismo valor de potencia mecánica en el eje P_{mec} = 0.7 p.u. a voltaje nominal (U_T = 1.0 p.u) se tiene que s = 5.00522e-3 p.u = 0.500522%, T_{elec} = -0.69651 p.u = 1293.292075 New-m, P_{elec} = 0.69248 p.u = 244.368 kW, Q_{elec} = 0.47623 p.u = 166.6805 kVAr.

En el programa patrón, se puede observar que al ajustar el valor de la carga de la máquina, automáticamente este ajusta la potencia en terminales a: P_{elec} = 242.81 kW y Q_{elec} = 157.63 kVAr; esto puede ser visto que se repite en las 14 máquinas de inducción integradas a la red de prueba como se puede apreciar en la Tabla 6; esto involucra discrepancias del fenómeno real; debido a que la potencia reactiva de la máquina de inducción es función del deslizamiento y esta correlacionado con el voltaje en terminales; y al resolver el flujo de potencia se logran valores muy diferentes de voltaje de barra en cada máquina, siendo evidente que la potencia reactiva no puede ser igual en todas las maquinas.

Sin embargo, debido a que FluPot considera un modelo más detallado, modelo RX, y en el si existe la influencia del voltaje y el deslizamiento sobre la potencia reactiva consumida en la máquina. De hecho, se evidencia en la Tabla 6, que el consumo de potencia reactiva en las máquinas depende del voltaje en terminales; dicha dependencia puede ser fácilmente vista en la Figura 9, donde se evidencia que a medida que el voltaje en terminales de la máquina disminuye aumenta los requerimientos de reactivo.

Tabla 6. Comparación de los Resultados de Potencia en Terminales de las Máquinas de Inducción

		Patrón		*FluPot*		*Error*	
Maquina	*Barra*	P_{elec} *[MW]*	Q_{elec} *[MVAr]*	P_{elec} *[MW]*	Q_{elec} *[MVAr]*	P_{elec} *[MW]*	Q_{elec} *[MVAr]*
1	16	0.24281	-0.15763	0.24464	-0.15201	-0.00183	-0.00562
2	17	0.24281	-0.15763	0.24463	-0.15404	-0.00182	-0.00359
3	18	0.24281	-0.15763	0.24463	-0.15445	-0.00182	-0.00318
4	19	0.24281	-0.15763	0.24463	-0.15467	-0.00182	-0.00296
5	20	0.24281	-0.15763	0.24463	-0.15397	-0.00182	-0.00366
6	21	0.24281	-0.15763	0.24464	-0.15288	-0.00183	-0.00475
7	22	0.24281	-0.15763	0.24464	-0.15235	-0.00183	-0.00528
8	23	0.24281	-0.15763	0.24463	-0.15251	-0.00182	-0.00512
9	24	0.24281	-0.15763	0.24463	-0.15472	-0.00182	-0.00291
10	25	0.24281	-0.15763	0.24463	-0.15310	-0.00182	-0.00453
11	26	0.24281	-0.15763	0.24463	-0.15350	-0.00182	-0.00413
12	27	0.24281	-0.15763	0.24463	-0.15410	-0.00182	-0.00353
13	28	0.24281	-0.15763	0.24463	-0.15392	-0.00182	-0.00371
14	29	0.24281	-0.15763	0.24463	-0.15382	-0.00182	-0.00381

Por otra parte, al contrastar los resultados mediante el cálculo del error absoluto se evidencia, que en el caso de la potencia activa en terminales del generador de inducción, la diferencia entre los resultados de FluPot y el patrón es casi la misma para todas las máquinas (<0.00182 kW) y un valor sumamente pequeño, lo cual hace inferir que los resultados son sumamente consistentes (ver Figura 10). Sin embargo al observar los errores en cuanto a la potencia reactiva, se hacen notorias diferencias. En la Figura 11, se ha trazado las discrepancias en la potencia reactiva, en el mayor de los casos no supera $6x10^{-3}$ MVAR, sin embargo estas discrepancias tienen su fundamento en el hecho de que los modelos empleados por ambos programas son

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

completamente diferentes. FluPot si considera a plenitud el comportamiento del voltaje en terminales sobre el desempeño de la máquina de inducción.

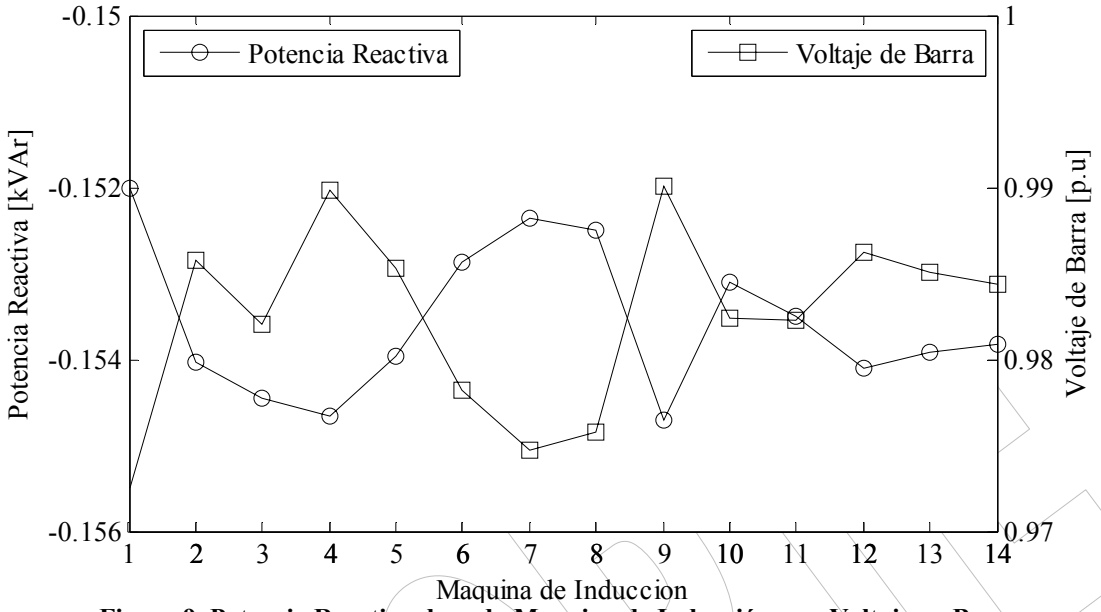


Figura 9. Potencia Reactiva de cada Maquina de Inducción y su Voltaje en Barra

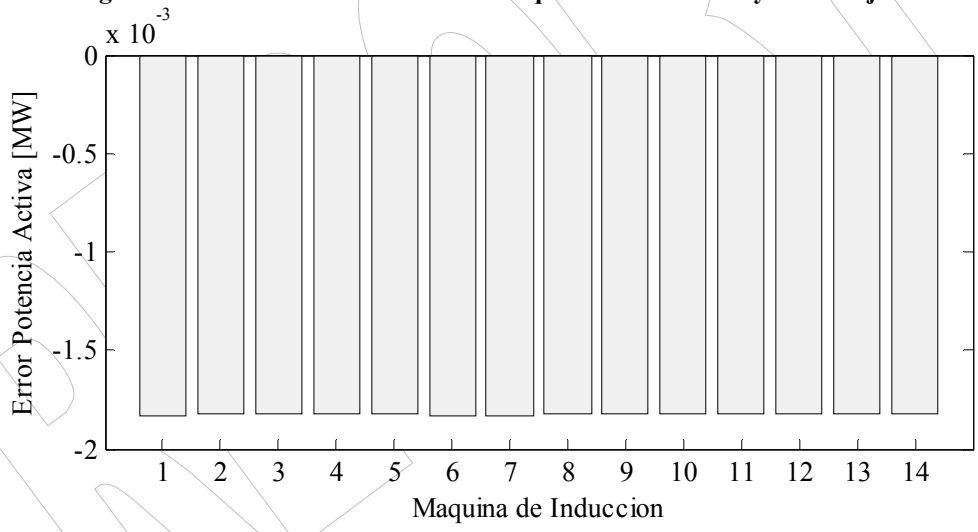


Figura 10. Error en la Potencia Activa de cada Maquina de Inducción

Es lógico concebir el hecho de que las discrepancias en la modelación de la máquina produzcan sendas discrepancias en el consumo de potencia reactiva de cada máquina de inducción, y por supuesto, esto afectara de sobre medida el perfil de voltajes en la red.

En la Tabla 7, se ha sumariado los resultados de los voltajes de barra en magnitud y ángulo para la red de prueba bajo las condiciones simuladas; y se ha incluido el cálculo de la discrepancia entre los resultados. Para las quince barras originales de la red de prueba los errores en la magnitud del voltaje están por debajo de 0.004 p.u, mientras que para la fase el error en estas barras escasamente supera 0.006 grados; siendo en todo momento un error por exceso a favor del programa FluPot; esto resulta especialmente cierto debido a que el programa FluPot en todo momento logra unos menores valores de consumo de reactivo que los resultados obtenidos por el patrón.

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

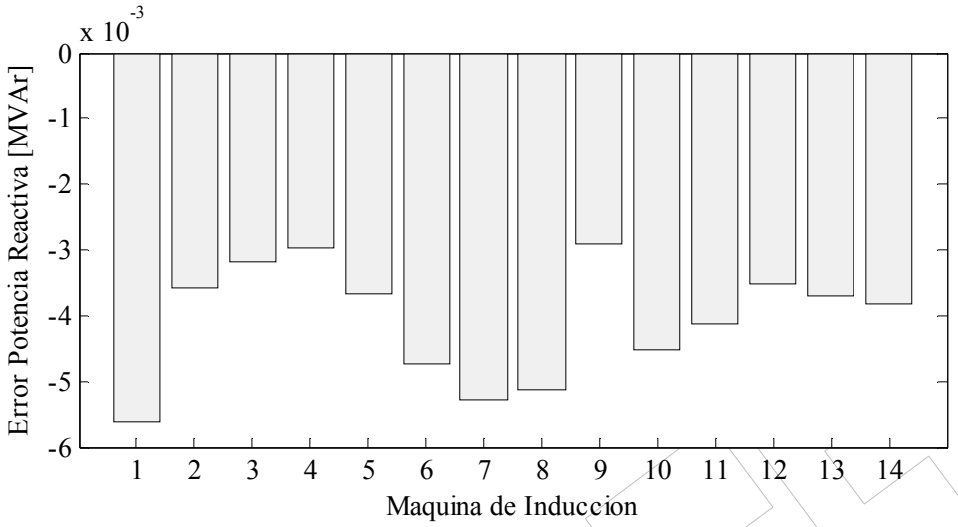


Figura 11. Error en la Potencia Reactiva de cada Maquina de Inducción

Tabla 7. Comparación de Resultados para Voltajes de Barra con ambos Programas

	Patrón		*FluPot*		*Error*	
Barra	*Magnitud [p.u]*	*Angulo [Grados]*	*Magnitud [p.u]*	*Angulo [Grados]*	*Magnitud [p.u]*	*Angulo [Grados]*
1	1.0000	0.000	1.0000	0.000	0.0000	0.000
2	0.9928	-2.250	0.9930	-2.246	-0.0002	-0.004
3	0.9925	-2.304	0.9927	-2.300	-0.0002	-0.004
4	0.9884	-3.104	0.9887	-3.100	-0.0003	-0.004
5	0.9880	-3.134	0.9882	-3.129	-0.0002	-0.005
6	0.9877	-3.135	0.9879	-3.131	-0.0002	-0.004
7	0.9846	-3.795	0.9849	-3.790	-0.0003	-0.005
8	0.9808	-4.438	0.9811	-4.432	-0.0003	-0.006
9	0.9784	-4.898	0.9787	-4.892	-0.0003	-0.006
10	0.9773	-5.128	0.9776	-5.122	-0.0003	-0.006
11	0.9750	-5.646	0.9754	-5.640	-0.0004	-0.006
12	0.9888	-2.364	0.9891	-2.359	-0.0003	-0.005
13	0.9869	-2.370	0.9872	-2.365	-0.0003	-0.005
14	0.9849	-2.422	0.9853	-2.417	-0.0004	-0.005
15	0.9848	-2.417	0.9852	-2.412	-0.0004	-0.005
16	0.9818	-2.062	0.9725	-5.276	0.0093	3.214
17	0.9898	-1.901	0.9858	-2.746	0.0040	0.845
18	0.9896	-1.954	0.9820	-3.433	0.0076	1.479
19	0.9854	-2.752	0.9898	-1.949	-0.0044	-0.803
20	0.9850	-2.781	0.9853	-2.775	-0.0003	-0.006
21	0.9847	-2.783	0.9782	-4.073	0.0065	1.290
22	0.9816	-3.440	0.9747	-4.760	0.0069	1.320
23	0.9778	-4.080	0.9758	-4.531	0.0020	0.451
24	0.9754	-4.538	0.9901	-1.895	-0.0147	-2.643
25	0.9743	-4.767	0.9824	-2.060	-0.0081	-2.707
26	0.9720	-5.284	0.9823	-2.056	-0.0103	-3.228
27	0.9858	-2.012	0.9862	-2.006	-0.0004	-0.006
28	0.9839	-2.017	0.9851	-2.776	-0.0012	0.759
29	0.9819	-2.067	0.9844	-2.010	-0.0025	-0.057

Sin embargo, al examinar el error de la magnitud y el ángulo del voltaje para las barras donde se encuentran conectadas las máquinas de inducción, las discrepancias resultan ser sustancialmente superior.

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

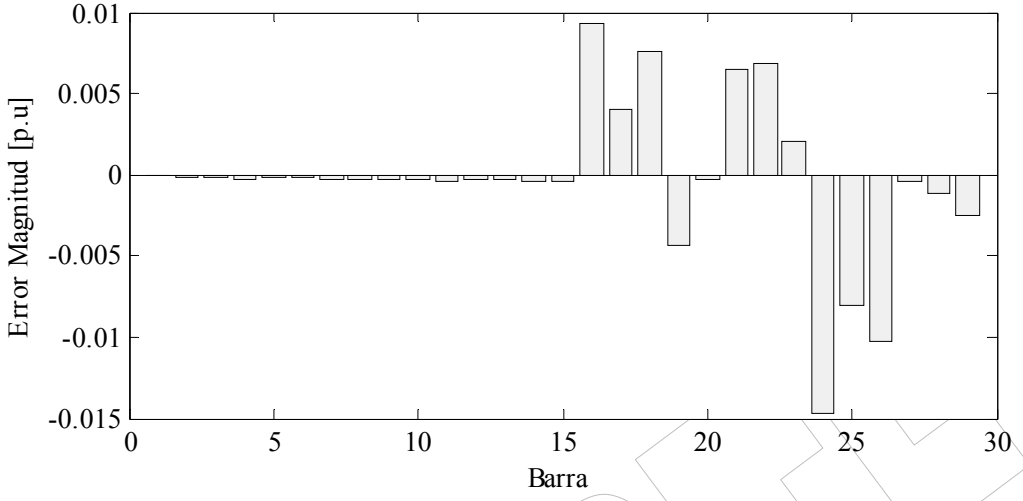


Figura 12. Error en la Magnitud del Voltaje de Barra

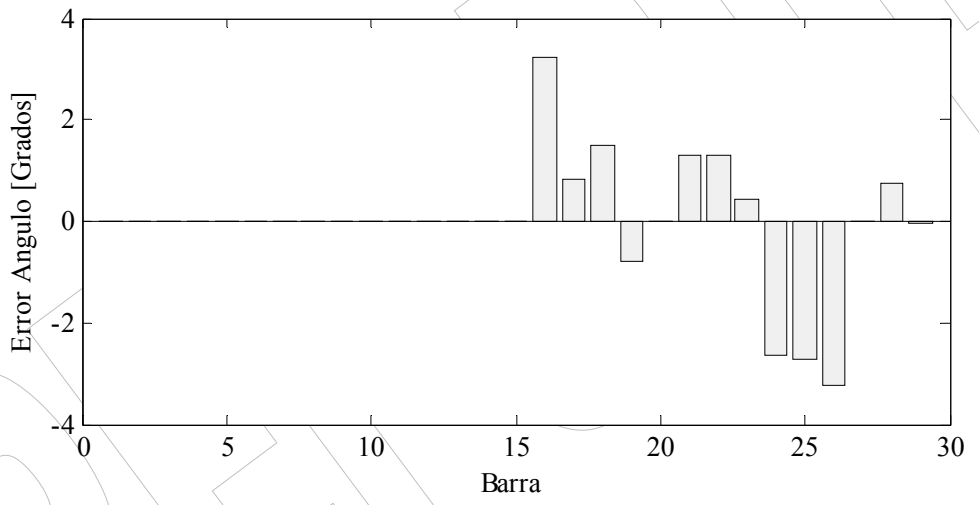


Figura 13. Error en el Angulo del Voltaje de Barra

En el caso de la barra 16 a la 29, que es donde se conectan las máquinas de inducción la diferencias en la magnitud del voltaje es siempre menor a 0.015 p.u, siendo esto un resultado razonablemente bajo (Figura 12). Sin embargo el ángulo del voltaje de barra en estas barras de conexión si posee una sustancial diferencia entre los resultados arrojados por los programas; que en el caso de algunas barras no supera los 3.2 grados.

Conclusiones

En este reporte de investigación se ha mostrado una metodología para tomar en consideración el comportamiento en régimen estacionario de la máquina de inducción, basado en el modelo de Steinmetz. La metodología fue implementada dentro del programa Flupot. Se efectuaron simulaciones sobre una red de prueba, integrando máquinas de inducción de jaula simple de ardilla operando como generador; y los resultados obtenidos son contrastados con los logrados con un programa comercial reconocido. Se reconoció que las metodologías empleadas por ambos programas son diferentes. De hecho el programa patrón emplea un modelo muy simple donde no considera los efectos de la variación del voltaje en terminales de la maquina sobre su deslizamiento y el consumo de potencia reactiva. Sin embargo, al contrastar los resultados, aunque existió discrepancias, se mostró la efectividad de los resultados logrados en el estudio de flujo de potencia empleando la metodología propuesta.

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

Referencia Documentales

[1] E. Feijóo and J. Cidrás, "*Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis*". In IEEE transactions on power systems, Vol. 14, NO. 1, Febrero del 2000.

[2] J. Cidrás, J. A. Martínez, J. A. Peças, and F. P. Maciel, "*Modelling of Nonlinear nodal Admittances in Load Flow Analysis*", in Proceedings of IFAC, Artículo Técnico,1992.

[3] S. Li, Tomsovic, and T. Hiyama, ¨Load Following functions using distributed energy resources", *Proceedings of the IEEE PES Summer Meeting*, Seattle. July 2000.

[4] Rajesh G. Kavasseri, "Steady State Analysis of an Induction Generator Infinite Bus System" (Paper no: 409 - 084)", *accepted for the Third IASTED International Conference on Power and Energy Systems* (EuroPES 2003).

REPORTE

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

Anexo A
Resultados de Flujo de Potencia en enlaces: Programa Patrón

Resultados Del Flujo de Potencia Realizado Por el Programa Patrón

Barra inicio	*Barra Final*	*Potencia Activa [MW]*	*Potencia Reactiva [MVAr]*	*Voltaje [p.u] (En barra de inicio)*	*Angulo [Grados] (En barra de inicio)*
Bus 1	Bus 2	15.658	2.511	1.00	0.00
Bus 2	Bus 1	-15.632	-1.881	0.99283	-2.250
	Bus 3	15.250	1.658		
	Bus 17	-0.243	0.160		
Bus 3	Bus 2	-15.248	-1.688	0.99255	-2.304
	Bus 12	0.414	0.785		
	Bus 4	13.591	0.590		
	Bus 18	-0.243	0.160		
Bus 4	Bus 3	1.180	0.418	0.98846	-3.104
	Bus 5	9.737	0.562		
	Bus 7	-0.243	0.160		
Bus 5	Bus 4	-1.180	-0.490	0.98800	-3.134
	Bus 6	0.096	0.196		
	Bus 20	-0.243	0.160		
Bus 6	Bus 5	-0.096	-0.196	0.98771	-3.135
	Bus 21	-0.243	0.160		
Bus 7	Bus 4	-9.711	-1.353	0.98463	-3.795
	Bus 8	8.040	0.995		
	Bus 22	-0.243	0.160		
Bus 8	Bus 7	-8.019	-0.901	0.98084	-4.438
	Bus 9	7.293	0.643		
	Bus 23	-0.243	0.160		
Bus 9	Bus 8	-7.280	-0.626	0.97841	-4.898
	Bus 10	6.883	0.400		
	Bus 24	-0.243	0.160		
Bus 10	Bus 9	-6.877	-0.472	0.97730	-5.128
	Bus 11	6.280	0.226		
	Bus 25	-0.243	0.160		
Bus 11	Bus 10	-6.267	-0.226	0.97505	-5.646
	Bus 26	-0.243	0.160		
Bus 12	Bus 3	-0.414	-0.782	0.98883	-2.364
	Bus 13	0.260	0.580		
	Bus 27	-0.243	0.160		
Bus 13	Bus 12	-0.260	-0.579	0.98695	-2.370
	Bus 14	0.415	0.410		
	Bus 28	-0.243	0.160		
Bus 14	Bus 13	-0.415	-0.409	98.49735	-2.422
	Bus 15	0.174	0.202		
	Bus 29	-0.243	0.160		
Bus 15	Bus 14	-0.174	-0.202	0.98485	-2.417
	Bus 16	-0.243	0.160		
Bus 16	Bus 15	0.243	-0.158	0.98187	-2.062
Bus 17	Bus 2	0.243	-0.158	98.98769	-1.901
Bus 18	Bus 3	0.243	-0.158	0.989603	-1.954
Bus 19	Bus 4	0.243	-0.158	0.985495	-2.752
Bus 20	Bus 5	0.243	-0.158	0.985034	-2.781
Bus 21	Bus 6	0.243	-0.158	0.984746	-2.783
Bus 22	Bus 7	0.243	-0.158	0.981657	-3.440
Bus 23	Bus 8	0.243	-0.158	0.977857	-4.080
Bus 24	Bus 9	0.243	-0.158	0.975417	-4.538
Bus 25	Bus 10	0.243	-0.158	0.974301	-4.767
Bus 26	Bus 11	0.243	-0.158	0.972046	-5.284
Bus 27	Bus 12	0.243	-0.158	0.985859	-2.012
Bus 28	Bus 13	0.243	-0.158	0.983986	-2.017
Bus 29	Bus 14	0.243	-0.158	0.981996	-2.067

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

Anexo B
Resultados de Flujo de Potencia en enlaces: FluPot

```
                    SUBRUTINA DE LECTURA DE DATOS
          ------------------------------------------------------
                        ******* RESUMEN *******
Archivo: Red_De_Kumamoto2.xls
Fecha: 5/3/2007
Caso: Ejemplo de la Red de Kumamoto con GS_7.801MVA
Año: 2006
Propietario: Marchena Williams ; Ornelas Carlos
         Base del Sistema: 30 MVA
         Número de Barras: 29
         Número de Enlaces: 28
      Resumen de Maquinas:
         Número de Maquinas de Induccion: 14
         Número de Maquinas de Sincronicas: 15
         Estudio : Dinamica del Sistema de Potencia
      Consideraciones para el flujo de potencia :
            Tolerancia del Error: 0.00001
            Numero Maximo de Iteraciones: 100
            Numero Maximo Interaciones de Control :  10
      Consideraciones para la perturbacion :
         Tipo de Perturbacion : CORTOCIRCUITO
         Tiempo de Insercion de la Perturbacion : 0.50000 seg
         Tiempo de Despeje de la Perturbacion : 0.08300 seg
            Tiempo de Final de la Simulacion : 3.00000 seg
            Paso de Tiempo : 0.00100 seg
                 Maquinas de Induccion Consideradas por el método RX

                 ******* Resumen de Maquinas de Induccion *******
          ---------------------------------------------------------
           Maq.   Barra              Tipo          Pn [MW]      Vn [kV]
          ---------------------------------------------------------
         1    16        Generador Induccion    0.30000       0.66000
         2    17        Generador Induccion    0.30000       0.66000
         3    18        Generador Induccion     0.30000       0.66000
         4    19        Generador Induccion     0.30000       0.66000
         5    20        Generador Induccion     0.30000       0.66000
         6    21        Generador Induccion     0.30000       0.66000
         7    22        Generador Induccion     0.30000       0.66000
         8    23        Generador Induccion     0.30000       0.66000
         9    24        Generador Induccion     0.30000       0.66000
         10   25        Generador Inducción     0.30000       0.66000
         11   26        Generador Induccion     0.30000       0.66000
         12   27        Generador Inducción     0.30000       0.66000
         13   28        Generador Induccion     0.30000       0.66000
         14   29        Generador Induccion     0.30000       0.66000
          ---------------------------------------------------------
```

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

******* Resumen de Maquinas Sincronicas *******

Maq.	Barra	Tipo	Sn[MVA]	Vn [kV]
1	1	Modelo Transitorio	20.000	13.800
2	2	Modelo Transitorio	7.801	13.800
3	3	Modelo Transitorio	7.801	13.800
4	4	Modelo Transitorio	7.801	13.800
5	5	Modelo Transitorio	7.801	13.800
6	6	Modelo Transitorio	7.801	13.800
7	7	Modelo Transitorio	7.801	13.800
8	8	Modelo Transitorio	7.801	13.800
9	9	Modelo Transitorio	7.801	13.800
10	10	Modelo Transitorio	7.801	13.800
11	11	Modelo Transitorio	7.801	13.800
12	12	Modelo Transitorio	7.801	13.800
13	13	Modelo Transitorio	7.801	13.800
14	14	Modelo Transitorio	7.801	13.800
15	15	Modelo Transitorio	7.801	13.800

Tiempo empleado en Load_Data_Procedure: 1.21174 seg

SUBRUTINA DE FLUJO DE POTENCIA

Potencias Generadas por Maquinas Sincronicas

Barra: 1 Pgen: 0.521066 p.u Qgen: 0.0816083 p.u

REPORTE

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

Flujo de Potencia en Enlaces

P 1-2 :	+15.63198 MW	P 2-1 :	-15.60574 MW
Q 1-2 :	+2.44825 MVAr	Q 2-1 :	-1.82064 MVAr
P 2-3 :	+15.22612 MW	P 3-2 :	-15.22350 MW
Q 2-3 :	+1.60098 MVAr	Q 3-2 :	-1.63068 MVAr
P 3-4 :	+13.57582 MW	P 4-3 :	-13.53400 MW
Q 3-4 :	+0.55180 MVAr	Q 4-3 :	-1.39645 MVAr
P 3-12 :	+0.40707 MW	P 12-3 :	-0.40636 MW
Q 3-12 :	+0.76926 MVAr	Q 12-3 :	-0.76601 MVAr
P 4-5 :	+1.17657 MW	P 5-4 :	-1.17625 MW
Q 4-5 :	+0.41040 MVAr	Q 5-4 :	-0.48287 MVAr
P 4-7 :	+9.72782 MW	P 7-4 :	-9.70173 MW
Q 4-7 :	+0.53606 MVAr	Q 7-4 :	-1.32694 MVAr
P 5-6 :	+0.09464 MW	P 6-5 :	-0.09462 MW
Q 5-6 :	+0.19194 MVAr	Q 6-5 :	-0.19188 MVAr
P 7-8 :	+8.03211 MW	P 8-7 :	-8.01187 MW
Q 7-8 :	+0.97352 MVAr	Q 8-7 :	-0.88000 MVAr
P 8-9 :	+7.28726 MW	P 9-8 :	-7.27428 MW
Q 8-9 :	+0.62614 MVAr	Q 9-8 :	-0.60940 MVAr
P 9-10 :	+6.87967 MW	P 10-9 :	-6.87361 MW
Q 9-10 :	+0.38891 MVAr	Q 10-9 :	-0.46136 MVAr
P 10-11 :	+6.27800 MW	P 11-10 :	-6.26561 MW
Q 10-11 :	+0.22003 MVAr	Q 11-10 :	-0.22000 MVAr
P 12-13 :	+0.25475 MW	P 13-12 :	-0.25433 MW
Q 12-13 :	+0.56795 MVAr	Q 13-12 :	-0.56688 MVAr
P 13-14 :	+0.41172 MW	P 14-13 :	-0.41127 MW
Q 13-14 :	+0.40211 MVAr	Q 14-13 :	-0.40094 MVAr
P 14-15 :	+0.17265 MW	P 15-14 :	-0.17261 MW
Q 14-15 :	+0.19747 MVAr	Q 15-14 :	-0.19746 MVAr
P 11-16 :	-0.24439 MW	P 16-11 :	+0.24464 MW
Q 11-16 :	+0.15400 MVAr	Q 16-11 :	-0.15200 MVAr
P 4-17 :	-0.24438 MW	P 17-4 :	+0.24463 MW
Q 4-17 :	+0.15600 MVAr	Q 17-4 :	-0.15403 MVAr
P 7-18 :	-0.24439 MW	P 18-7 :	+0.24463 MW
Q 7-18 :	+0.15542 MVAr	Q 18-7 :	-0.15344 MVAr
P 3-19 :	-0.24438 MW	P 19-3 :	+0.24463 MW
Q 3-19 :	+0.15662 MVAr	Q 19-3 :	-0.15467 MVAr
P 5-20 :	-0.24438 MW	P 20-5 :	+0.24463 MW
Q 5-20 :	+0.15593 MVAr	Q 20-5 :	-0.15396 MVAr
P 8-21 :	-0.24439 MW	P 21-8 :	+0.24464 MW
Q 8-21 :	+0.15485 MVAr	Q 21-8 :	-0.15287 MVAr
P 10-22 :	-0.24439 MW	P 22-10 :	+0.24464 MW
Q 10-22 :	+0.15433 MVAr	Q 22-10 :	-0.15233 MVAr
P 9-23 :	-0.24439 MW	P 23-9 :	+0.24464 MW
Q 9-23 :	+0.15449 MVAr	Q 23-9 :	-0.15250 MVAr
P 2-24 :	-0.24438 MW	P 24-2 :	+0.24463 MW
Q 2-24 :	+0.15666 MVAr	Q 24-2 :	-0.15471 MVAr
P 14-25 :	-0.24439 MW	P 25-14 :	+0.24463 MW
Q 14-25 :	+0.15547 MVAr	Q 25-14 :	-0.15350 MVAr
P 15-26 :	-0.24439 MW	P 26-15 :	+0.24463 MW
Q 15-26 :	+0.15546 MVAr	Q 26-15 :	-0.15348 MVAr
P 12-27 :	-0.24438 MW	P 27-12 :	+0.24463 MW
Q 12-27 :	+0.15605 MVAr	Q 27-12 :	-0.15409 MVAr
P 6-28 :	-0.24438 MW	P 28-6 :	+0.24463 MW
Q 6-28 :	+0.15588 MVAr	Q 28-6 :	-0.15392 MVAr
P 13-29 :	-0.24439 MW	P 29-13 :	+0.24463 MW
Q 13-29 :	+0.15577 MVAr	Q 29-13 :	-0.15381 MVAr

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.

Perdidas Totales del Sistema

Pérdidas Totales P: -3.27102 MW Q: 1.11025 MVAr

Voltajes de Barra [p.u]

Bus	V [p.u]	Ang [grados]
1	1.0000	0.00000
2	0.9930	-2.24692
3	0.9927	-2.30043
4	0.9887	-3.10041
5	0.9882	-3.12973
6	0.9879	-3.13119
7	0.9849	-3.79006
8	0.9811	-4.43278
9	0.9787	-4.89259
10	0.9776	-5.12201
11	0.9754	-5.64032
12	0.9891	-2.35987
13	0.9872	-2.36544
14	0.9853	-2.41739
15	0.9852	-2.41255
16	0.9725	-5.27687
17	0.9858	-2.74635
18	0.9820	-3.43337
19	0.9898	-1.94916
20	0.9853	-2.77537
21	0.9782	-4.07345
22	0.9747	-4.76017
23	0.9758	-4.53154
24	0.9901	-1.89584
25	0.9824	-2.06098
26	0.9823	-2.05607
27	0.9862	-2.00609
28	0.9851	-2.77663
29	0.9844	-2.01040

Número de Iteraciones: 5

Tiempo Empleado en Load Flow: 2.35338 seg

Resultados en las Máquinas de Induccion

Maquina	Barra	Pt [MW]	Qt [MVAR]	s [p.u]
1	16	-0.24464	0.15201	-0.00534
2	17	-0.24463	0.15404	-0.00519
3	18	-0.24463	0.15345	-0.00523
4	19	-0.24463	0.15467	-0.00514
5	20	-0.24463	0.15397	-0.00519
6	21	-0.24464	0.15288	-0.00528
7	22	-0.24464	0.15235	-0.00532
8	23	-0.24464	0.15251	-0.00530
9	24	-0.24463	0.15472	-0.00514
10	25	-0.24463	0.15351	-0.00523
11	26	-0.24463	0.15350	-0.00523
12	27	-0.24463	0.15410	-0.00518
13	28	-0.24463	0.15392	-0.00520
14	29	-0.24463	0.15382	-0.00521

PREPRINT

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin consentimiento de los autores. Copyright © 2007.