

**Reporte de Investigación
2007-15**

Validación de FluPot: Modelo Polinomial para Cargas Estáticas

**Responsables: Carlos Ornelas
William Marchena
Frednides Guillen**

Supervisor: Francisco M. González-Longatt



**Línea de Investigación:
Fuentes Alternas de Energía
y
Generación Distribuida**



Proyecto SimSP

Mayo-2007

1.0. Generalidades

Uno de los más comunes procedimientos computacionales usados en el análisis de sistemas de potencia es el cálculo de flujo de potencia. Éste 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. Por ello es importante definir la configuración y la localización y tamaño de cargas, generación y equipos, al igual que se requiere una representación o modelo correcto para lograr el objetivo del estudio.

Las cargas son uno de los elementos de barra a modelar en el flujo de potencia, éstas pueden ser clasificadas en una o una combinación de los siguientes tipos, tomando en consideración su dependencia respecto al voltaje: (1) Potencia constante, (2) Impedancia constante, (3) Corriente constante.

El presente documento se muestra el fundamento teórico y la metodología necesaria para modelar cargas dependientes de voltaje en el estudio de flujo de potencia. Además se muestra los resultados de simulaciones emprendidas con un programa implementado en Matlab™ y un software comercial sobre una red de prueba. Resultados de considerar una carga de la red de prueba en tres comportamientos son comparados y se muestran graficas representativas del comportamiento de la carga ante una variación considerable del voltaje. Finalmente se muestran conclusiones del documento.

2. Modelación de Cargas en Flujo de Potencia

El término “carga” puede poseer diferentes significados en los sistemas de potencia [1]:

- Un dispositivo o equipo, conectado al sistema de potencia que consume potencia.
- La potencia total (activa y/o reactiva) consumida por todos los dispositivos conectados a un sistema de potencia.
- Una porción del sistema que o es explícitamente representada en el modelo de un sistema, pero es tratado como si solamente fuere un dispositivo que consume potencia conectado a una barra en el modelo del sistema.
- La potencia de salida de un generador o una planta de generación.

Las cargas, como son representadas en simulaciones computacionales a grandes escalas, representan la agregación o consolidación de cientos o miles de dispositivos individuales tales como motores, iluminación o dispositivos eléctricos [3].

Un modelo de carga es una representación matemática de las relaciones entre el voltaje de barra (magnitud y frecuencia) y la potencia (activa y reactiva) o corriente que fluye en la barra de carga [1]. El término de modelo de carga puede referirse a las ecuaciones mismas, o las ecuaciones más valores específicos de los parámetros de las ecuaciones. Dependiendo de la implementación computacional de esas ecuaciones en un programa específico, la potencia de carga o su corriente pueden no ser explícitamente calculadas pero ser útil para pensar en el modelo en esos términos.

Es típico que se consideren dos tipos de cargas según su modelo:

- *Modelo de Carga Estática.* El modelo que representa la potencia activa y reactiva en cualquier instante de tiempo como funciones de la magnitud y frecuencia del voltaje de barra al mismo instante. Los modelos de cargas estáticas son usados tantos componentes de cargas esencialmente estáticas, por ejemplo, cargas resistivas, de iluminación, o como una aproximación de cargas con componentes dinámicos, como cargas motóricas.
- *Modelo de Cargas Dinámicas.* Es un modelo que expresa las potencias activas y reactivas en cualquier instante como funciones de la magnitud del voltaje y frecuencia en instantes de tiempo pasados y, usualmente incluyendo el instante presente. Ecuaciones en diferencias o diferenciales pueden ser usadas para representar tales modelos.

El comportamiento de las cargas estáticas es modelado considerando tres tipos [1]:

- *Modelo a Impedancia Constante:* Representa un modelo de carga estática, donde la potencia varía directamente con el cuadrado de la magnitud del voltaje. De igual forma puede ser denominada como un modelo de carga de admitancia constante.
- *Modelo a Corriente Constante:* Representa un modelo de carga estática, donde la potencia varía directamente con la magnitud del voltaje.

- *Potencia Constante*: Representa un modelo de carga estática, donde la potencia no varía cuando ocurren cambios en la magnitud del voltaje. Estas también son llamados modelos de carga a MVA constante. Debido a que los dispositivos a MVA constantes, tales como motores o dispositivos electrónicos, no mantienen esta característica por debajo de cierto voltaje (típicamente el 80 a 90% del voltaje nominal), muchos modelos de carga proveen cambios en los MVA constante (y otros tipos de modelos estáticos) para impedancia constante o el disparo de la carga por debajo de un valor especificado de voltaje.

En la Figura 1, se muestra el comportamiento de la potencia en una carga considerando los posibles modelos de carga estática y sus respectivas relaciones potencia/voltaje.

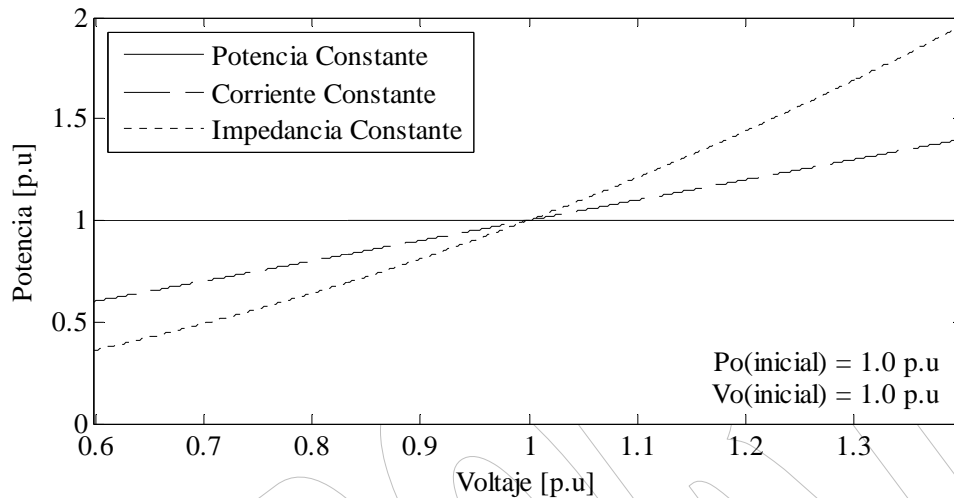


Figura 1. Efecto de la Variación del Voltaje en la Carga para Tres Tipos de Comportamiento

Múltiples han sido las consideraciones para modelar las cargas en los análisis de sistemas de potencia, sin embargo es típico considerar:

- Modelo Exponencial
- Modelo Polinomial

En éste documento se está interesado únicamente en la modelación para el flujo de potencia, pero los modelos presentados incluyen los efectos asociados a cambios de frecuencia. Sin embargo, un adecuado ajuste en las constantes asociadas al modelo, permite restringir los modelos solo al caso de análisis en condiciones de régimen estacionario de la dependencia de voltaje de las cargas.

2.1. Modelo Exponencial

El modelo de carga estática exponencial, representa la relación entre la potencia y el voltaje por medio de una ecuación exponencial, usualmente de la siguiente forma [3]:

$$P = P_0 (\bar{V})^\alpha (1 + k_{pf} \Delta f) \quad (1)$$

$$Q = Q_0 (\bar{V})^\beta (1 + k_{qf} \Delta f) \quad (2)$$

$$\text{Siendo: } \bar{V} = \frac{V}{V_0} \quad \Delta f = \frac{f - f_0}{f_0}$$

P_0 es la potencia activa inicial de operación y Q_0 la potencia reactiva inicial de operación; ambas referidas a un voltaje V_0 .

Dos o más exponentes son frecuentemente incluidos en cada ecuación. Los parámetros de este modelo son los exponentes α y β y el factor de potencia. Estos exponentes definen la característica de la carga como sigue:

- 0 = Potencia constante
- 1 = Corriente constante
- 2 = Impedancia constante

Otros exponentes pueden ser usados para representar el efecto agregado o consolidado de diferentes tipos de componentes de cargas. Los exponentes mayores a 2 o menores a 0 pueden ser apropiados para ciertos tipos de cargas [1].

La dependencia de la frecuencia de la carga estática es tomada en cuenta por medio de las constantes:

- k_{pf} : Constante de dependencia de la potencia activa de la frecuencia. Esta constante típicamente varía entre 0 y 3.0.
- k_{qf} : Constante de dependencia de la potencia reactiva de la frecuencia. Esta constante típicamente varía entre -2.0 y 0.

En este modelo, la dependencia de la frecuencia de la carga puede ser obviado, ajustando estas dos últimas constantes a cero ($k_{pf} = k_{qf} = 0$)

2.2. Modelo Polinomial

El modelo polinomial para una carga estática representa la relación de potencias a la magnitud de voltaje como ecuaciones en forma de polinomios, usualmente de la forma [3]:

$$P = P_0 \left[\alpha_1 (\bar{V})^2 + \alpha_2 \bar{V} + \alpha_3 \right] (1 + k_{pf} \Delta f) \quad (3)$$

$$Q = Q_0 \left[\beta_1 (\bar{V})^2 + \beta_2 \bar{V} + \beta_3 \right] (1 + k_{qf} \Delta f) \quad (4)$$

$$\text{Siendo: } \bar{V} = \frac{V}{V_0} \quad \Delta f = \frac{f - f_0}{f_0}$$

Este modelo expresa la potencia activa (P) y reactiva (Q) de una determinada carga, en una función exponencial del la desviación del voltaje (V) a partir de una condición inicial (V_0) y siendo Δf la desviación en la frecuencia.

Los parámetros de este modelos son los coeficientes: $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \alpha_3, \beta_3$, y el factor de potencia de la carga. Este modelo es algunas veces denominado el *modelo ZIP* [3], debido a que consiste de la suma de los términos de impedancia constante (Z), corriente constante (I) y potencia constante (P).

Cada porción es definida por los coeficientes del modelo respectivamente. Para representar un determinado dispositivo, los V_0 debe ser el voltaje nominal del dispositivo y, P_0 y Q_0 deben ser la potencia consumida a la potencia nominal. Sin embargo, cuando se usa estos modelos para representar una barra de carga, V_0, P_0 y Q_0 , son normalmente tomados como valores de una condición operativa inicial del sistema de potencia

La dependencia de la frecuencia de la carga estática es tomada en cuenta por medio de las constantes:

- k_{pf} : Constante de dependencia de la potencia activa de la frecuencia. Esta constante típicamente varía entre 0 y 3.0.
- k_{qf} : Constante de dependencia de la potencia reactiva de la frecuencia. Esta constante típicamente varía entre -2.0 y 0.

En este modelo, la dependencia de la frecuencia de la carga puede ser obviada, ajustando estas dos últimas constantes a cero ($k_{pf} = k_{qf} = 0$).

3. Consideraciones de Simulación

Para mostrar el comportamiento de la modelación de la cargas con dependencia de voltaje se ha efectuado una serie de simulaciones. Se ha considerado como la red de prueba empleada fue la red de prueba de Kumamoto en 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 [2].

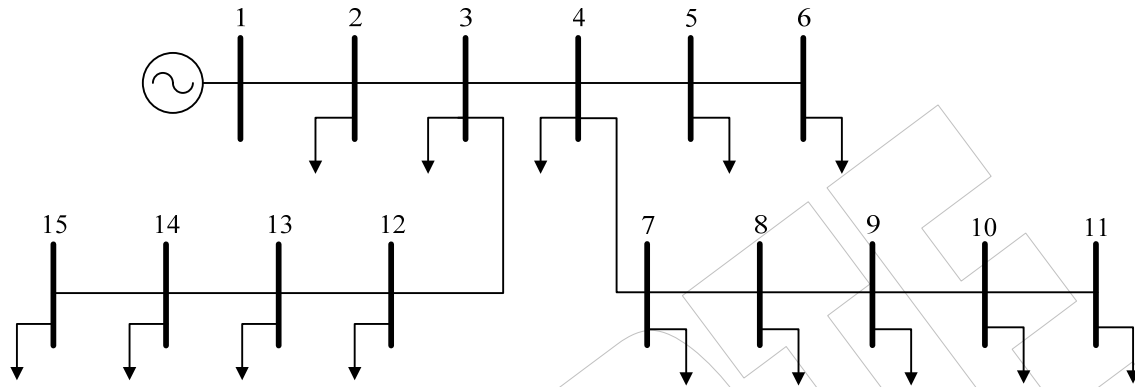


Figura 2. Red de Prueba: Sistema de Distribución de Kumamoto [2].

Tabla 1. Datos de Líneas y Cargas del Sistema de Distribución de Kumamoto [2].

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} : 13.8kV; S_{base} : 30MVA

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 Raphson.

Los resultados del 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 4.0, de la empresa *Operation Technologies Inc.* ha sido tomado como 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.

4. Resultados

Las simulaciones ha sido efectuadas sobre la red de Kumamoto (Figura 1) para varios escenarios de modelación de las cargas varios casos donde se han considerado el modelo de las cargas con dependencia del voltaje: en cada escenario se han considerado el análisis del comportamiento de un tipo característica de las cargas (común a todas las cargas de la red):

- *Caso 1:* Carga a Potencia Constante.
- *Caso 2:* Carga a Corriente Constante.
- *Caso 3:* Carga a Impedancia Constante.
- *Caso 4:* Carga a 80% Impedancia Constante y 20% Potencia Constante.
- *Caso 5:* Carga a 50% Impedancia Constante y 50% a Corriente Constante.

En todos los casos se ha considerado, se ha considerado la dependencia de voltaje en las cargas, mediante el uso del modelo polinomial. Los parámetros del modelo polinomial han sido ajustado en cada caso para cumplir con el escenario planteado y se obviado la dependencia de las cargas de la frecuencia ($k_{pf} = k_{qf} = 0$).

Tabla 3. Parámetros empleados para cada Escenarios

<i>Caso</i>	<i>Descripción</i>	α_1	α_2	α_3	β_1	β_2	β_3
1	Carga a Potencia Constante	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0
2	Carga a Corriente Constante	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0
3	Carga a Impedancia Constante	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
4	Carga a 80% Impedancia Constante y 20% Potencia Constante	0.8	0.0	0.2	0.8	0.0	0.2
5	Carga a 50% Impedancia Constante y 50% Corriente Constante	0.5	0.5	0.0	0.5	0.5	0.0

4.1. Caso 1: Carga a Potencia Constante

Se ha considerado todas las cargas por su modelo a potencia constante ($\alpha_3 = 1.0$ y $\beta_3 = 1$), por lo que se no existe dependencia alguna de consumo de la carga en función del voltaje.

Luego de efectuadas las simulaciones pertinentes en la Tabla 4, 5 y 6 se resumen los resultados y se comparan: los voltajes de barra, flujo de potencia en ramas y las pérdidas totales de transmisión sobre la red de prueba respectivamente.

Tabla 4. Comparación de Resultados de Voltajes de Barra entre FluPot y el Patrón. Caso 1

Barra	Patrón		FluPot		Diferencia	
	Magnitud [p.u]	Angulo [Grados]	Magnitud [p.u]	Angulo [Grados]	Magnitud [p.u]	Angulo [Grados]
Bus 1	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Bus 2	0.9973	-2.7623	0.9974	-2.7469	-0.0001	-0.0154
Bus 3	0.9971	-2.8282	0.9973	-2.8125	-0.0002	-0.0157
Bus 4	0.9938	-3.7577	0.9940	-3.7368	-0.0002	-0.0209
Bus 5	0.9934	-3.8046	0.9936	-3.7835	-0.0002	-0.0211
Bus 6	0.9932	-3.8277	0.9934	-3.8065	-0.0002	-0.0212
Bus 7	0.9906	-4.5437	0.9908	-4.5184	-0.0002	-0.0253
Bus 8	0.9874	-5.2729	0.9876	-5.2433	-0.0002	-0.0296
Bus 9	0.9853	-5.7824	0.9855	-5.7499	-0.0002	-0.0325
Bus 10	0.9843	-6.0286	0.9845	-5.9947	-0.0002	-0.0339
Bus 11	0.9822	-6.5655	0.9824	-6.5284	-0.0002	-0.0371
Bus 12	0.9952	-3.1610	0.9953	-3.1434	-0.0001	-0.0176
Bus 13	0.9939	-3.3109	0.9940	-3.2924	-0.0001	-0.0185
Bus 14	0.9924	-3.4844	0.9925	-3.4650	-0.0001	-0.0194
Bus 15	0.9921	-3.4865	0.9923	-3.4670	-0.0001	-0.0195

A partir de los resultados de los voltajes de barra mostrados en la Tabla 4, se muestra que en el caso de la modelación de las cargas de la red de prueba a 100% de potencia constante, la diferencia de los resultados entre FluPot y el patrón, resulta para la mayos discrepancia de la magnitud del voltaje de barra es menor al 0.0002 p.u, y la diferencia es menor a 0.0339 grados para los ángulos.

Tabla 5. Comparación de Resultados de Flujo de Potencia en Ramas entre FluPot y Patrón. Caso 1

Barra de Inicio	Barra Final	Patrón		FluPot		Diferencia	
		Potencia Activa [p.u]	Potencia Reactiva [p.u]	Potencia Activa [p.u]	Potencia Reactiva [p.u]	Potencia Activa [p.u]	Potencia Reactiva [p.u]
Bus 1	Bus 2	0.6365	0.0232	0.6365	0.0225	0.0000	0.0007
Bus 2	Bus 1	-0.6353	0.0074	-0.6352	0.0079	-0.0001	-0.0005
	Bus 3	0.6145	-0.0095	0.6144	-0.0100	0.0001	0.0005
Bus 3	Bus 2	-0.6143	0.0087	-0.6143	0.0092	0.0000	-0.0005
	Bus 12	0.0462	0.0051	0.0462	0.0051	0.0000	0.0000
	Bus 4	0.5186	-0.0190	0.5186	-0.0195	0.0000	0.0005
Bus 4	Bus 3	-0.5168	-0.0074	-0.5186	-0.0070	0.0018	-0.0004
	Bus 5	0.0555	0.0033	0.0555	0.0032	0.0000	0.0001
	Bus 7	0.3655	-0.0057	0.3654	-0.0060	0.0001	0.0003
Bus 5	Bus 4	-0.0555	-0.0057	-0.0555	-0.0057	0.0000	0.0000
	Bus 6	0.0113	0.0012	0.0113	0.0012	0.0000	0.0000
Bus 6	Bus 5	-0.0113	-0.0012	-0.0113	-0.0012	0.0000	0.0000
Bus 7	Bus 4	-0.3644	-0.0198	-0.3644	-0.0196	0.0000	-0.0002
	Bus 8	0.3006	0.0131	0.3006	0.0130	0.0000	0.0001
Bus 8	Bus 7	-0.2997	-0.0093	-0.2997	-0.0092	0.0000	-0.0001
	Bus 9	0.2674	0.0060	0.2674	0.0059	0.0000	0.0001
Bus 9	Bus 8	-0.2669	-0.0051	-0.2669	-0.0050	0.0000	-0.0001
	Bus 10	0.2456	0.0029	0.2456	0.0028	0.0000	0.0001
Bus 10	Bus 9	-0.2454	-0.0052	-0.2454	-0.0051	0.0000	-0.0001
	Bus 11	0.2174	0.0023	0.2174	0.0022	0.0000	0.0001
Bus 11	Bus 10	-0.2169	-0.0022	-0.2170	-0.0022	0.0001	0.0000
Bus 12	Bus 3	-0.0461	-0.0049	-0.0461	-0.0048	0.0000	-0.0001
	Bus 13	0.0329	0.0034	0.0329	0.0034	0.0000	0.0000
Bus 13	Bus 12	-0.0329	-0.0034	-0.0329	-0.0033	0.0000	-0.0001
	Bus 14	0.0300	0.0030	0.0300	0.0030	0.0000	0.0000
Bus 14	Bus 13	-0.0300	-0.0030	-0.0300	-0.0030	0.0000	0.0000
	Bus 15	0.0139	0.0014	0.0139	0.0014	0.0000	0.0000
Bus 15	Bus 14	-0.0139	-0.0014	-0.0139	-0.0014	0.0000	0.0000

Puede ser visto a partir de la Tabla 6, que para el caso evaluado a 100% Potencia constante de la modelación de las cargas en la Red de Prueba de Kumamoto, la diferencia de los resultados para los flujos de potencia en las ramas resultan menores a 0.0018 p.u, para la potencia activa y menor a 0.0007 p.u para el flujo de potencia reactiva en rama.

Tabla 6. Comparación de Resultados de Pérdidas Totales de Potencia entre FluPot y Patrón. Caso 1

	<i>Patron</i>		<i>FluPot</i>		<i>Diferencia</i>	
	<i>Potencia Activa</i>	<i>Potencia Reactiva</i>	<i>Potencia Activa</i>	<i>Potencia Reactiva</i>	<i>Potencia Activa</i>	<i>Potencia Reactiva</i>
	[p.u]	[p.u]	[p.u]	[p.u]	[p.u]	[p.u]
Pérdidas de Potencia Total del sistema	0.006489	-0.021319	0.006452	-0.022070	0.000037	0.000751

REPORTE

4.2. Caso 2: Carga a Corriente Constante

En éste caso, se considera que todas las cargas por tiene un comportamiento de impedancia constante ($\alpha_2 = 1.0$ y $\beta_2 = 1.0$), por lo que el valor de las cargas evidencia una dependencia lineal con respecto a las variaciones de voltaje.

En las Tabla 7 se muestra un sumario y comparativo (por diferencias directas) del voltaje de barra en la red de prueba para el caso de modelación de todas las cargas a corriente constante.

Tabla 7. Comparación de Resultados del Voltajes de Barra entre FluPot y el Patrón. Caso 2

Barra	Patrón		FluPot		Diferencia	
	Magnitud [p.u]	Angulo [Grados]	Magnitud [p.u]	Angulo [Grados]	Magnitud [p.u]	Angulo [Grados]
Bus 1	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Bus 2	0.9974	-2.7425	0.9976	-2.7168	-0.0002	-0.0257
Bus 3	0.9972	-2.8079	0.9974	-2.7817	-0.0002	-0.0262
Bus 4	0.9940	-3.7302	0.9942	-3.6946	-0.0002	-0.0356
Bus 5	0.9936	-3.7769	0.9938	-3.7409	-0.0002	-0.0360
Bus 6	0.9934	-3.8000	0.9936	-3.7637	-0.0002	-0.0363
Bus 7	0.9908	-4.5084	0.9911	-4.4643	-0.0003	-0.0441
Bus 8	0.9876	-5.2295	0.9879	-5.1771	-0.0002	-0.0524
Bus 9	0.9855	-5.7331	0.9859	-5.6749	-0.0004	-0.0582
Bus 10	0.9846	-5.9763	0.9849	-5.9154	-0.0003	-0.0609
Bus 11	0.9825	-6.5067	0.9829	-6.4396	-0.0004	-0.0671
Bus 12	0.9953	-3.1376	0.9955	-3.1103	-0.0002	-0.0273
Bus 13	0.9940	-3.2860	0.9942	-3.2582	-0.0002	-0.0278
Bus 14	0.9925	-3.4576	0.9927	-3.4294	-0.0002	-0.0282
Bus 15	0.9923	-3.4596	0.9924	-3.4314	-0.0001	-0.0282

Examinando la Tabla 7, se muestra que el caso evaluado, cargas modelado para un comportamiento a 100% corriente constante en la Red de Prueba de Kumamoto, la diferencia de los resultados para el voltaje de barra es menor a 0.0004 p.u en el caso de las magnitudes, y menor de 0.0671 grados para los ángulos.

4.3. Caso 3: Carga a Impedancia Constante

Se considera que todas las cargas por tiene un comportamiento de impedancia constante ($\alpha_1 = 1.0$ y $\beta_1 = 1.0$), por lo que el valor de las cargas evidencia una dependencia cuadrática con respecto a las variaciones de voltaje. En la Tabla 8 se muestra un sumario y comparativo (por diferencias directas) del voltaje de barra en la red de prueba para el caso de modelación de todas las cargas a impedancia constante.

Tabla 8. Comparación de Resultados del Perfil de Voltajes de barra entre FluPot y el Patrón. Caso 3

Barra	Patrón		FluPot		Diferencia	
	Magnitud [p.u]	Angulo [Grados]	Magnitud [p.u]	Angulo [Grados]	Magnitud [p.u]	Angulo [Grados]
Bus 1	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Bus 2	0.9975	-2.7231	0.9977	-2.6886	-0.0002	-0.0345
Bus 3	0.9973	-2.7881	0.9975	-2.7529	-0.0002	-0.0352
Bus 4	0.9941	-3.7033	0.9944	-3.6551	-0.0003	-0.0482
Bus 5	0.9937	-3.7499	0.9940	-3.7012	-0.0003	-0.0487
Bus 6	0.9935	-3.7728	0.9938	-3.7239	-0.0003	-0.0489
Bus 7	0.9910	-4.4740	0.9913	-4.4138	-0.0003	-0.0602
Bus 8	0.9878	-5.1872	0.9882	-5.1153	-0.0004	-0.0719
Bus 9	0.9858	-5.6850	0.9862	-5.6049	-0.0004	-0.0801
Bus 10	0.9848	-5.9254	0.9853	-5.8413	-0.0005	-0.0841
Bus 11	0.9828	-6.4493	0.9833	-6.3566	-0.0005	-0.0927
Bus 12	0.9954	-3.1148	0.9956	-3.0793	-0.0002	-0.0355
Bus 13	0.9941	-3.2616	0.9943	-3.2262	-0.0002	-0.0354
Bus 14	0.9926	-3.4313	0.9928	-3.3962	-0.0002	-0.0351
Bus 15	0.9924	-3.4333	0.9926	-3.3982	-0.0002	-0.0351

Puede ser visto a partir de la Tabla 8, que para el caso evaluado la diferencia de los resultados para la magnitud de voltaje de barra es menor a 0.0005 p.u, mientras que las diferencias en el ángulo del voltaje resulta menor de 0.0927 grados para los ángulos.

4.4. Caso 4: Carga a 80% Impedancia Constante y 20% Potencia Constante

A fin de evaluar el desempeño de la modelación de las cargas en el programa FluPot, se procedió a efectuar simulaciones considerando una carga combinada, donde el 80% de la misma posee un comportamiento a impedancia constante y un 20% de potencia constante ($\alpha_1 = 0.80$, $\alpha_2 = 0.20$ y $\beta_1 = 0.80$, $\beta_2 = 0.20$).

Tabla 9. Comparación de Resultados del Perfil de Voltajes de barra entre Flupot y Patrón. Caso 4

Barra	Patrón		FluPot		Diferencia	
	Magnitud [p.u]	Angulo [Grados]	Magnitud [p.u]	Angulo [Grados]	Magnitud [p.u]	Angulo [Grados]
Bus 1	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Bus 2	0.9975	-2.7308	0.9977	-2.6998	-0.0002	-0.0310
Bus 3	0.9973	-2.7960	0.9975	-2.7643	-0.0002	-0.0317
Bus 4	0.9941	-3.7141	0.9943	-3.6708	-0.0002	-0.0433
Bus 5	0.9937	-3.7607	0.9939	-3.7169	-0.0002	-0.0438
Bus 6	0.9935	-3.7837	0.9937	-3.7397	-0.0002	-0.0440
Bus 7	0.9909	-4.4878	0.9912	-4.4338	-0.0003	-0.0540
Bus 8	0.9877	-5.2041	0.9881	-5.1398	-0.0004	-0.0643
Bus 9	0.9857	-5.7042	0.9861	-5.6327	-0.0004	-0.0715
Bus 10	0.9847	-5.9458	0.9851	-5.8707	-0.0004	-0.0751
Bus 11	0.9827	-6.4723	0.9831	-6.3895	-0.0004	-0.0828
Bus 12	0.9954	-3.1240	0.9956	-3.0916	-0.0002	-0.0324
Bus 13	0.9941	-3.2713	0.9943	-3.2389	-0.0002	-0.0324
Bus 14	0.9926	-3.4418	0.9928	-3.4093	-0.0002	-0.0325
Bus 15	0.9924	-3.4438	0.9925	-3.4114	-0.0002	-0.0324

Para el caso propuesto, de carga con dependencia mixta del voltaje, los resultados de los flujos de potencia pueden ser vistos en la Tabla 7. A partir de las diferencias calculadas en los voltajes de barra se muestra que la cota superior del error absoluto para las magnitudes de voltaje de barra es 0.0004 p.u, y en el caso de los ángulo, las discrepancias obtenidas son resultan ser mayores a 0.0828 grados para los ángulos.

4.5. Caso 5: Carga a 50% Impedancia Constante y 50% Corriente Constante

En este escenario se evalúa el desempeño de la modelación de las cargas en el programa FluPot, considerando una carga combinada, donde el 50% de la misma posee un comportamiento a impedancia constante y un 50% de corriente constante ($\alpha_1 = 0.50$, $\alpha_2 = 0.50$ y $\beta_1 = 0.50$, $\beta_2 = 0.50$).

Tabla 10. Comparación de Resultados del Perfil de Voltajes de barra entre FluPot y el Patrón. Caso 5

Barra	Patrón		FluPot		Diferencia	
	Magnitud [p.u]	Angulo [Grados]	Magnitud [p.u]	Angulo [Grados]	Magnitud [p.u]	Angulo [Grados]
Bus 1	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Bus 2	0.9975	-2.7327	0.9976	-2.7025	-0.0001	-0.0302
Bus 3	0.9973	-2.7980	0.9975	-2.7671	-0.0002	-0.0309
Bus 4	0.9940	-3.7167	0.9943	-3.6746	-0.0003	-0.0421
Bus 5	0.9936	-3.7633	0.9939	-3.7208	-0.0003	-0.0425
Bus 6	0.9934	-3.7863	0.9937	-3.7435	-0.0003	-0.0428
Bus 7	0.9909	-4.4912	0.9912	-4.4387	-0.0003	-0.0525
Bus 8	0.9877	-5.2082	0.9881	-5.1458	-0.0004	-0.0624
Bus 9	0.9857	-5.7089	0.9861	-5.6395	-0.0004	-0.0694
Bus 10	0.9847	-5.9508	0.9851	-5.8779	-0.0004	-0.0729
Bus 11	0.9826	-6.4779	0.9831	-6.3976	-0.0005	-0.0803
Bus 12	0.9954	-3.1262	0.9956	-3.0946	-0.0002	-0.0316
Bus 13	0.9941	-3.2737	0.9943	-3.2420	-0.0002	-0.0317
Bus 14	0.9926	-3.4444	0.9928	-3.4126	-0.0002	-0.0318
Bus 15	0.9923	-3.4464	0.9925	-3.4146	-0.0002	-0.0318

Puede ser visto a partir de la Tabla 10, que para el caso evaluado a Impedancia Constante al 50% y Potencia Constante al 50% de la carga para la Red de Prueba de Kumamoto, la diferencia de los resultados para el voltaje de barra es menor a 0.0004 p.u, para todas las magnitudes, y menor de 0.0803 grados para los ángulos.

4.6. Comparación

Una vez efectuadas simulaciones sobre la red de prueba, considerando la modelación de las cargas en forma polinomial para representar las posibles dependencias del voltaje, se procedió a construir graficas del error en la magnitud y ángulo de voltaje, para cada una de las barras, de los casos simulados (Figura 2 y 3).

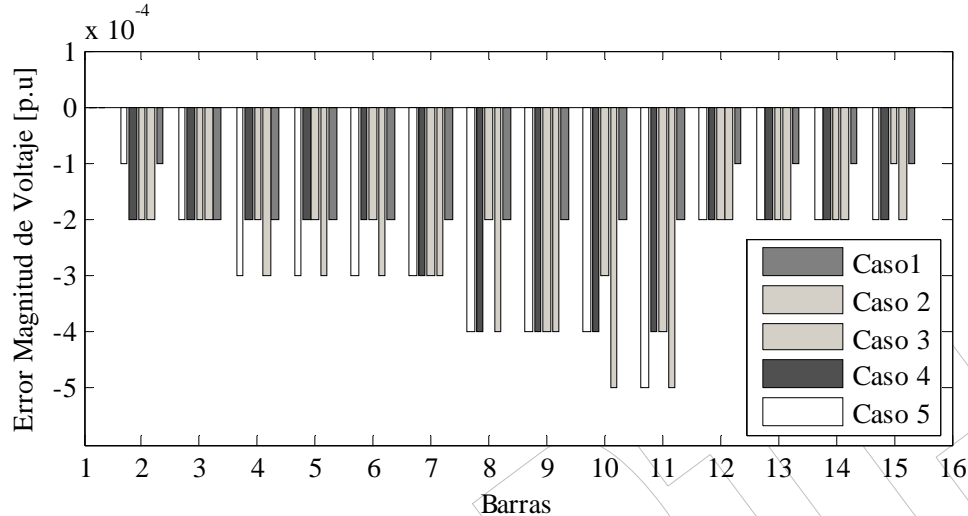


Figura 3. Diferencia en la Magnitud del Voltaje para Cada Barra en función del Caso Simulado

Examinando el error en la magnitud de voltaje para cada barra (Figura 2), se muestra que entre cada uno de los casos de carga modeladas en forma polinomial, la diferencia en la magnitud del voltaje es sumamente pequeña (menor a 1×10^{-4} p.u.).

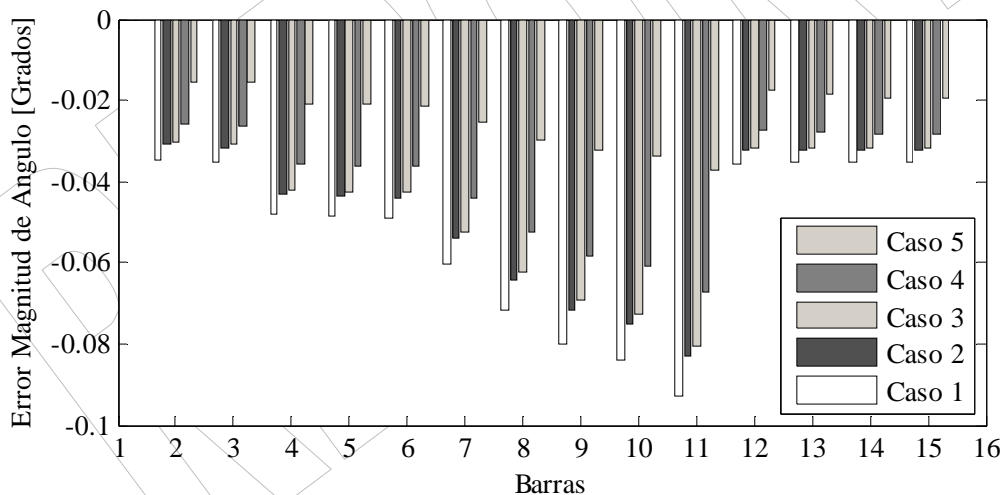


Figura 4. Diferencia en el Angulo del Voltaje para Cada Barra en función del Caso Simulado

Por otra parte, si se observa el comportamiento del error en el ángulo de voltaje para cada barra (Figura 3), se muestra que entre cada uno de los casos de carga modeladas en forma polinomial, la diferencia en el ángulo del voltaje es pequeña (menor a 0.01 grados).

En general, se muestra que las mayores diferencias en magnitud y ángulo de voltaje son en todas las barras resulta para el modelo de potencia constante, mientras que las menores discrepancias suceden es en el caso de las cargas modelas a 50% de impedancia constante y 50% a corriente constante.

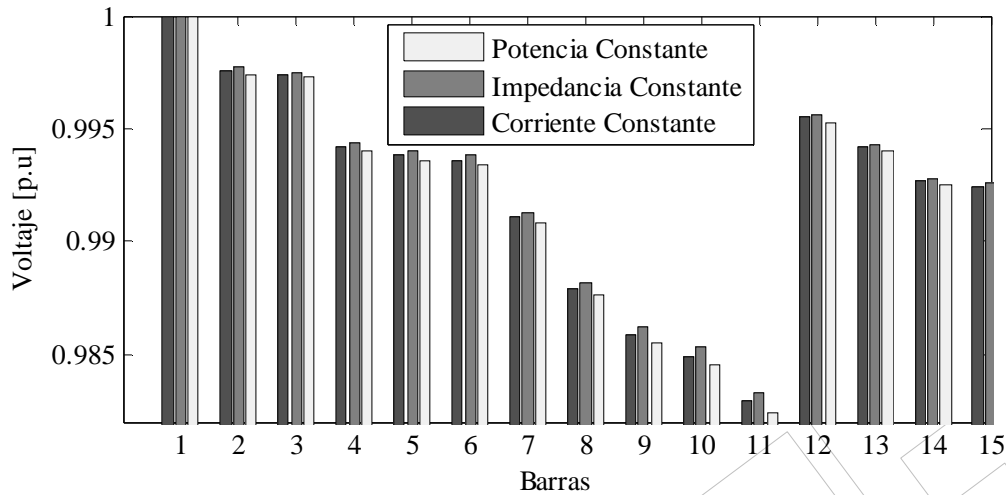


Figura 5. Magnitud de Voltaje para cada Barra para tres comportamientos diferentes de la carga

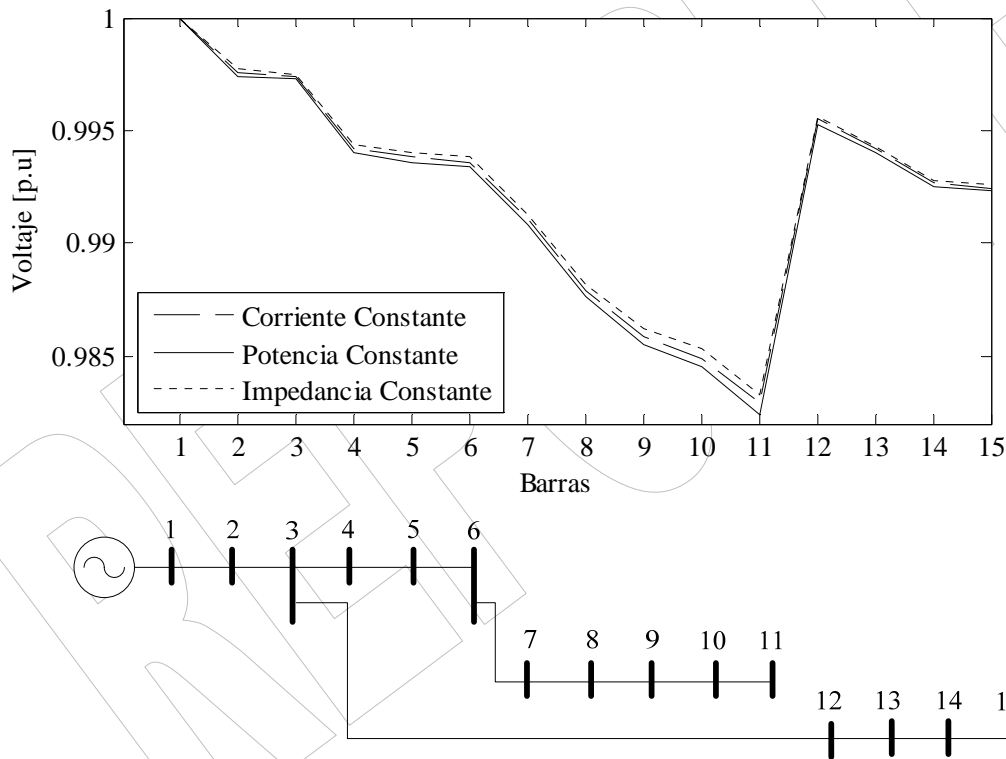


Figura 6. Magnitud de Voltaje para cada Barra para tres comportamientos diferentes de la carga

Si se analiza el comportamiento de la magnitud de voltaje en las barras de la red de prueba considerada para tres comportamientos diferentes de la dependencia de voltaje de las cargas, se observa siempre los la magnitud de voltaje logrados con la modelación de la carga a potencia constante proveen el escenario mas pesimista, es decir, que este modelo provee los menores niveles de voltaje con respecto a considerar cualquiera de los otras dependencia de voltaje de las cargas.

En contraposición, considerar en las cargas la dependencia cuadrática del voltaje, como en el caso de una impedancia constante produce los mayores perfiles de voltaje en la red. Por su parte, el comportamiento de la cargas a corriente constante, logra un perfil de voltaje que se encuentra en todas las barras entre dos extremos; el superior dado por la modelación de las cargas a impedancia constante y en la parte inferior por el modelo a potencia constante de la carga.

5. Conclusiones

En este documento se han presentado las bases de la modelación de cargas estáticas para el flujo de potencia. El modelo polinomial para cargas estáticas fue implementado dentro del programa para análisis de flujo de potencia, Flupot; simulaciones para varios escenarios fueron realizadas sobre una reconocida red de prueba.

Los resultados del flujo de potencia sobre la red de prueba empleando Flupot fueron contrastados contra un reconocido programa comercial. Diferencias entre los resultados obtenidos con ambos programas fueron calculadas, para las magnitudes y ángulos de voltajes de barra.

Se encontró que las discrepancias entre ambos programas fue considerada aceptable, de modo que se puede afirmar que el programa para calculo de flujos de potencia Flupot, se encuentra validad para efectuar estudios que consideren cargas estáticas, considerando el efecto de variación con respecto al voltaje por medio del modelo polinomico.

6. Trabajos a Futuro

Resultado de esta investigación, surge la posibilidad de nuevos trabajos, a continuación se menciona una breve lista:

- Evaluar el impacto, que los modelos de las cargas estáticas tienen sobre las perdidas técnicas en redes de transmisión.
- Incluir en el programa FluPot: modelo exponencial para cargas estáticas, modelo del programa EPRI LOADSYN, modelo del programa ETMSP, y el modelo del programa PTI PSS/E. Además de generar una base de datos con parámetros de modelación para cargas típicas.
- Incluir la dependencia de la frecuencia en la modelación de cargas a fin de ser integrado en el programa de análisis de comportamiento dinámico de sistemas de potencia SimSP.

7. Referencias Documentales

- [1] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. "Load Representation for Dynamic Performance Analysis". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No.2, May 1993.
- [2] S. Li, Tomsovic, and T. Hiyama, "Load Following functions using distributed energy resources", *Proceedings of the IEEE PES Summer Meeting*, Seattle. July 2000.
- [3] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. "Standards Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No.3, Augt 1995.