



## 9º ENTEC – Encontro de Tecnologia: 23 a 28 de novembro de 2015

### MATPOWER COMO FERRAMENTA PARA ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

*Pablo Henrique Camilo Capuchinho<sup>1</sup>; Edilberto Pereira Teixeira<sup>2</sup>*  
*<sup>1,2</sup> Universidade de Uberaba*  
*pablo.henriquecamilo@gmail.com<sup>1</sup>; edilberto.teixeira@uniube.br<sup>2</sup>*

#### Resumo

A solução do problema de fluxo de potência é fundamental e muito utilizado no desenvolvimento de projetos, operação e planejamento dos sistemas elétricos de potência. Sua utilização pode ser tanto independente, como um algoritmo exclusivo, como pode fazer parte de um algoritmo mais complexo como uma sub-rotina que obtêm os dados de entrada para o algoritmo principal (Expósito; Conejo; Cañizares, 2011).

A resolução do problema de fluxo de carga permite o cálculo dos parâmetros do sistema em regime permanente. Por meio desta poderosa ferramenta é possível determinar as tensões nas barras e seus respectivos ângulos e o fluxo de potência em cada elemento percorrido por corrente no sistema analisado.

Atualmente para análise de sistemas de energia existem vários métodos para o cálculo do fluxo de carga sendo o método de Newton o mais comumente utilizado por ser um método clássico para a resolução dos sistemas de equações que representam os sistemas reais.

O presente artigo apresenta a resolução de problemas de fluxo de potência em sistemas de energia elétrica através do pacote MATPOWER, um pacote do Matlab™ M-files. Dentro do escopo deste trabalho é apresentado uma simulação de um sistema, de 14 barras, já validado pelo IEEE, pelo método de Newton bem como a metodologia para inserção de dados, os principais comandos e os dados obtidos como saída após a simulação.

**Palavras-chave:** Power Flow. Matlab. Newton-Raphson. Simulação.

#### 1 Introdução

A solução do problema de fluxo de potência no Brasil possui características únicas uma vez que as redes de energia elétrica no país possuem dimensões continentais. Para obter perfil de tensões nas barras e o fluxo de carga no sistema ou entre sistemas são utilizadas algumas ferramentas computacionais poderosas que foram desenvolvidas para permitir a análise, operação e planejamento dos sistemas de potência.

O cálculo de fluxo de carga para grandes redes é realizado utilizando-se métodos computacionais desenvolvidos para a resolução do sistema de equações e inequações algébricas que constituem o modelo estático da rede. A resolução destes sistemas torna-se impraticável para o ser humano, pois a máquina apresenta resultados com alto grau de precisão e rapidez (MOTICELLI, 1983).

Uma vez que a principal função dos sistemas de energia é fornecer potência ativa e reativa às diversas cargas conectadas o estudo de metodologias para o cálculo do fluxo de carga se torna indispensável (ELGERD, 1981).

Embora o estudo teórico sobre fluxo de potência seja indispensável uma abordagem através de simulação de sistemas por meio de ferramentas computacionais é de extrema importância. Através do MATPOWER é possível obter uma visão aproximada dos sistemas e ferramentas utilizados atualmente para

## 9º ENTEC – Encontro de Tecnologia: 23 a 28 de novembro de 2015

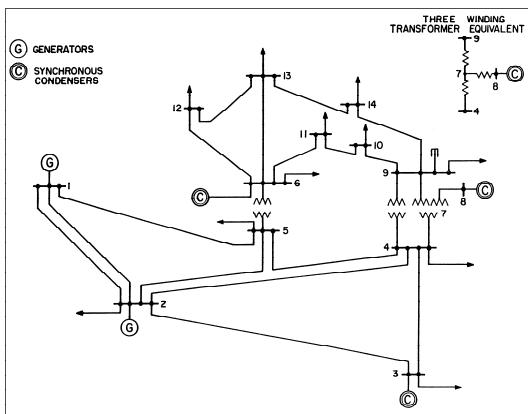
análise, operação e planejamento dos sistemas de energia.

Neste contexto é apresentado o pacote MATPOWER como ferramenta para a consolidação dos conceitos teóricos bem como o ponto de partida para o aprendizado de temas mais complexo.

### 2 Materiais e Métodos

Para a apresentação das potencialidades do pacote MATPOWER como ferramenta para análise em sistemas de potência foi realizada a simulação de um sistema de 14 barras de sua biblioteca no software Matlab™ através do método de *Newton*.

**Figura 1:** Sistema 14 barras simulado.



**Fonte:** Página da Engenharia Elétrica Universidade de Washington.

O sistema analisado é composto por 14 barras classificadas conforme a **Tabela 1**, 5 geradores (Geração máxima de 772,4MW e -52 à 148MVAR) e 11 cargas (Carga total de 259MW e 73,5MVAR)

**Tabela 1:** Classificação Barras.

Tipo	Barra
Barra V $\theta$ (Referência)	1
Barra PQ (Carga)	4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13 e 14
Barra PV (Geração)	2, 3, 6 e 8

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A entrada de dados no MATPOWER é realizada através da edição de um *script* no formato M-file ou Mat-file do Matlab™ (ZIMMERMAN, SÁNCHEZ, 2015) onde os dados dos componentes da rede, obtidos na modelagem, são inseridos em seus respectivos campos.

Após a entrada de dados é executada a simulação e exibição dos resultados obtidos através software.

### 3 Resultados

Para resolução do problema de fluxo de carga a modelagem matemática dos sistemas de energia elétrica representa um ponto fundamental na simulação e otimização das redes elétricas, pois deve representar o mais fiel possível o comportamento dos sistemas reais emulados (Expósito; Conejo; Cañizares, 2011).

Os transformadores e transformadores de fase são modelados com um modelo ramo comum, que consiste em um modelo de linha de transmissão de  $\pi$  padrão, com impedância série e susceptância shunt, em série com um transformador de mudança de fase ideal. Os geradores são modelados como uma injeção de potência complexa em sua respectiva barra. As cargas de potência constante são modeladas como uma quantidade de potência ativa e reativa consumida em sua respectiva barra. Capacitores e indutores em derivação são modelados como uma impedância conectada a terra (ZIMMERMAN, SÁNCHEZ, 2015).

Após a modelagem dos componentes do sistema a entrada de dados é realizada através do preenchimento do *script* de entrada de dados. Os campos de preenchimento são *system MVA base*, *bus data*, *generator data*, *branch data* e opcionalmente *gencost* (ZIMMERMAN, SÁNCHEZ, 2015).

Os dados de entrada são preenchidos manualmente em forma de matrizes devendo o usuário atentar para que não

## 9º ENTEC – Encontro de Tecnologia: 23 a 28 de novembro de 2015

ocorra discordância entre os valores modelados e os digitados.

**Figura 2:** Parte do arquivo de entrada de dados do MATPOWER.

```

%%----- Power Flow Data -----%%
%% system MVA base
mpc.baseMVA = 100;

%% bus data
% bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax Vmin
mpc.bus = [
1 3 0 0 0 0 1 1.06 0 0 1 1.06 0.94;
2 2 21.7 12.7 0 0 1 1.045 -4.98 0 1 1.06 0.94;
3 2 94.2 19 0 0 1 1.01 -12.72 0 1 1.06 0.94;
4 1 47.8 -3.5 0 0 1 1.019 -10.33 0 1 1.06 0.94;
5 1 7.6 1.6 0 0 1 1.02 -8.78 0 1 1.06 0.94;
6 2 11.2 7.5 0 0 1 1.07 -14.22 0 1 1.06 0.94;
7 1 0 0 0 0 1 1.062 -13.37 0 1 1.06 0.94;
8 2 0 0 0 0 1 1.09 -13.36 0 1 1.06 0.94;
9 1 29.5 16.6 0 19 1 1.056 -14.94 0 1 1.06 0.94;
10 1 9 5.8 0 0 1 1.051 -15.1 0 1 1.06 0.94;
11 1 3.5 1.8 0 0 1 1.057 -14.79 0 1 1.06 0.94;
12 1 6.1 1.6 0 0 1 1.055 -15.07 0 1 1.06 0.94;
13 1 13.5 5.8 0 0 1 1.05 -15.16 0 1 1.06 0.94;
14 1 14.9 5 0 0 1 1.036 -16.04 0 1 1.06 0.94;
];
    
```

Fonte: MATPOWER

O primeiro passo para a realização da simulação é carregar o arquivo de entrada de dados do caso desejado através do comando *loadcase*. A resolução do problema de fluxo de potência através do método de Newton é executada através do comando *runpf* que gera um relatório com os resultados em forma de matrizes (ZIMMERMAN, SÁNCHEZ, 2015).

**Figura 3:** Resultados *System Summary*.

```

MATPOWER Version 5.1, 20-Mar-2015 -- AC Power Flow (Newton)
Newton's method power flow converged in 2 iterations.
Converged in 0.60 seconds
-----
| System Summary
-----
How many?          How much?          P (MW)          Q (MVar)
-----
Buses              14          Total Gen Capacity  772.4          -52.0 to 148.0
Generators         5          On-line Capacity   772.4          -52.0 to 148.0
Committed Gens     5          Generation (actual) 272.4          82.4
Loads              11          Load               259.0          73.5
Fixed              11          Fixed               259.0          73.5
Dispatchable      0          Dispatchable       -0.0 of -0.0   -0.0
Shunts             1          Shunt (inj)         -0.0           21.2
Branches           20          Losses (I^2 * R)    13.39          54.54
Transformers       3          Branch Charging (inj) -             24.4
Inter-ties         0          Total Inter-tie Flow 0.0           0.0
Areas              1

-----
Minimum          Maximum
-----
Voltage Magnitude  1.010 p.u. @ bus 3      1.050 p.u. @ bus 8
Voltage Angle     -16.03 deg @ bus 14     0.00 deg @ bus 1
P Losses (I^2*R)  -                     4.30 MW @ line 1-2
Q Losses (I^2*X)  -                     13.12 MVar @ line 1-2
    
```

Fonte: MATPOWER

A quantidade de interações e o tempo gasto até a convergência do método são

apresentados na primeira linha do relatório. Esta informação é útil ao se comparar os esforços computacionais e velocidade dos métodos disponíveis para solução do fluxo de potência. Os resultados obtidos estão subdivididos em: *System summary*, *Bus data* e *Branch data*.

Em *System summary* são apresentados dados como as quantidades de elementos presentes no sistema, capacidade total de geração do sistema, total de cargas e perdas por efeito joule nas linhas de transmissão.

Uma análise econômica busca um ponto de operação em que o carregamento das linhas produza um cenário onde estas perdas denominadas perdas técnicas são minimizadas.

Ainda em *System summary* são apresentadas as barras com maior e menor tensão e ângulo. As tensões das barras do sistema elétrico de potência devem ser mantidas abaixo dos limites impostos pela isolação dos equipamentos.

O carregamento das linhas também influencia diretamente no valor da tensão nas barras podendo em situações extremas levar o sistema ao colapso de tensão.

O ângulo de carga deve estar dentro da faixa que permita que os geradores do sistema operem em paralelo, ou seja, que o sistema seja estável.

Em *Bus data* é apresentada a magnitude da tensão e o ângulo de cada barra em relação a barra PV de referência, bem como a quantidade de potência ativa e reativa que flui pelos barramentos. As perdas de potência ativa são obtidas pela diferença entre a potência ativa total gerada e a consumida pelas cargas.

Nos sistemas elétricos de potência o fluxo de potência ativa em uma linha de transmissão está diretamente ligado ao ângulo de defasagem entre as tensões dos barramentos.





## 9º ENTEC – Encontro de Tecnologia: 23 a 28 de novembro de 2015

O valor máximo para o fluxo de potência ocorre para  $\theta$  igual a  $90^\circ$  que corresponde ao limite de estabilidade estática entre duas áreas em sincronismo, porém na prática utiliza-se o limite de estabilidade transitória em que  $\theta$  não supera os  $40^\circ$  (SUCENA P., 2011).

observado em seu final. Este fenômeno é conhecido como efeito Ferranti e tem maior impacto em linhas de grande comprimento devendo ser monitorado o valor de tensão obtido por meio do fluxo de para várias configurações da rede (ZANETTA JR., 2005)

Figura 4: Resultados *Bus data*.

Bus Data							
Bus #	Voltage		Generation		Load		
	Mag (pu)	Ang (deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	
1	1.060	0.000*	232.39	-16.55	-	-	
2	1.045	-4.983	40.00	43.56	21.70	12.70	
3	1.010	-12.725	0.00	25.08	94.20	19.00	
4	1.018	-10.313	-	-	47.80	-3.90	
5	1.020	-8.774	-	-	7.60	1.60	
6	1.070	-14.221	0.00	12.73	11.20	7.50	
7	1.062	-13.360	-	-	-	-	
8	1.090	-13.360	0.00	17.62	-	-	
9	1.056	-14.939	-	-	29.50	16.60	
10	1.051	-15.097	-	-	9.00	5.80	
11	1.057	-14.791	-	-	3.50	1.80	
12	1.055	-15.076	-	-	6.10	1.60	
13	1.050	-15.156	-	-	13.50	5.80	
14	1.036	-16.034	-	-	14.90	5.00	
Total:			272.39	82.44	259.00	73.50	

Fonte: MATPOWER

Figura 5: Resultados *Branch data*.

Branch Data									
Branch #	From Bus	To Bus	From Bus Injection		To Bus Injection		Loss (I <sup>2</sup> * Z)		
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	
1	1	2	156.88	-20.40	-152.59	27.68	4.298	13.12	
2	1	5	75.51	3.85	-72.75	2.23	2.763	11.41	
3	2	3	73.24	3.56	-70.91	1.60	2.323	9.79	
4	2	4	56.13	-1.55	-54.45	3.02	1.677	5.09	
5	2	5	41.52	1.17	-40.61	-2.10	0.904	2.76	
6	3	4	-23.29	4.47	23.66	-4.84	0.373	0.95	
7	4	5	-61.16	15.82	61.67	-14.20	0.514	1.62	
8	4	7	28.07	-9.68	-28.07	13.38	0.000	1.70	
9	4	9	16.08	-0.43	-16.08	1.73	0.000	1.30	
10	5	6	44.09	12.47	-44.09	-8.05	0.000	4.42	
11	6	11	7.35	3.56	-7.30	-3.44	0.055	0.12	
12	6	12	7.79	2.50	-7.71	-2.35	0.072	0.15	
13	6	13	17.75	7.22	-17.54	-6.80	0.212	0.42	
14	7	8	-0.00	-17.16	0.00	17.62	0.000	0.46	
15	7	9	28.07	5.78	-28.07	-4.98	0.000	0.80	
16	9	10	5.23	4.22	-5.21	-4.18	0.013	0.03	
17	9	14	9.43	3.61	-9.31	-3.36	0.116	0.25	
18	10	11	-3.79	-1.62	3.80	1.64	0.013	0.03	
19	12	13	1.61	0.75	-1.61	-0.75	0.006	0.01	
20	13	14	5.64	1.75	-5.59	-1.64	0.054	0.11	
Total:							13.393	54.54	

Fonte: MATPOWER

As tensões nas barras, calculadas através do fluxo de carga, são um indicador do carregamento da linha. O operador do sistema elétrico deve realizar as devidas correções do valor da tensão quando esta fica abaixo ou acima de seu valor nominal. Para reestabelecer a tensão a seus valores nominais são utilizados capacitores e reatores em paralelo, compensadores síncronos e estáticos, transformadores com tap variável e geradores síncronos.

Em *Branch data* são exibidos os valores de potência ativa e reativa que percorrem as linhas de transmissão assim como as perdas. O valor máximo de potência ativa em uma linha de transmissão é determinado em função do limite térmico dos condutores, dos limites de estabilidade para operação síncrona e ainda pela estabilidade de tensão (SUCENA P., 2011).

Caso a linha opere com carga baixa ou a vazio um aumento proibitivo na tensão é

### 4 Discussão

O sistema elétrico de potência tem se expandido ao longo dos anos alcançando dimensões continentais. A análise dos sistemas elétricos atualmente não é possível sem o uso de alguma ferramenta computacional uma vez que se tornou impraticável a resolução de problemas tão complexos de forma manual. As ferramentas computacionais disponíveis permitem a resolução destes problemas de forma muito rápida e precisa.

O fluxo de carga para redes de energia elétrica, assim como uma foto, registra o comportamento da rede em regime permanente. Aprender utilizar este método permite o estudo de temas mais complexos, como a análise de estabilidade, problemas de otimização e operação econômica do sistema elétrico, abrindo as portas para o estudo de temas avançados como a operação das redes de energia em tempo real.

**9º ENTEC – Encontro de Tecnologia: 23 a 28 de novembro de 2015****5 Conclusão**

Neste artigo foi possível verificar a aplicabilidade do MATPOWER como uma ferramenta para análise do fluxo de potência em sistemas de energia elétrica bem como algumas das aplicações dos resultados lançando as bases para estudos mais elaborados e complexos.

**Referências**

ELGERD, O. **Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1981.

GÓMEZ-EXPÓSITO, ANTONIO; CONEJO, ANTÔNIO J., CAÑIZARES, CLAUDIO. **Sistemas de Energia Elétrica Análise e Operação**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1983.

SUCENA P., JOSÉ P. **Redes de Energia Elétrica: Uma Análise Sistêmica**. 3. ed. Lisboa: IST Press, 2011.

STEVENSON JR., WILLIAN D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2. ed. São Paulo: McGrawHill, 1986.

ZANETTA JR., LUIZ CERA. **Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência**. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

ZIMMERMAN, RAY D.; MURILLO-SÁNCHEZ, CARLOS E.. **Matpower 5.1 User's Manual**. 2015. Disponível em: <<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/manual.pdf>>. Acesso em: Ago. 2015.

**14 Bus Power Flow Test Case**. 2015. Disponível em: <[http://www.ee.washington.edu/research/ps\\_tca/pf14/pg\\_tca14bus.htm](http://www.ee.washington.edu/research/ps_tca/pf14/pg_tca14bus.htm)>. Acesso em: Ago. 2015.