



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

**GAT 24
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ**

GRUPO IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

MODELAGEM DE CARGA PARA ESTUDOS DINÂMICOS

Paulo Gomes* Antônio de P. Guarini Mariana Marçal P. de Souza Alexandre G. Massaud

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

Cláudio Ferreira José Manuel E. Vicente Pedro Paulo de C. Mendes Antônio Marcio C. Ribeiro

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

RESUMO

Esse trabalho tem o objetivo de apresentar uma metodologia para determinação da melhor representação de carga em função da variação de tensão da rede, para que possa ser utilizada nos estudos de estabilidade transitória e dinâmica. Mais especificamente, melhorar a representação das cargas nos estudos de estabilidade dinâmica quando de grandes perturbações, a partir dos registros em campo do desempenho das cargas de diferentes regiões do SIN.

Através de dados de medições realizadas em campo, são obtidos os modelos estáticos ZIP (com e sem restrição) e dinâmico LINEAR referentes às cargas de diferentes tipos ramais alimentadores, e posteriormente é realizado um estudo comparativo entre as medidas de campo e o desempenho destes modelos.

PALAVRAS-CHAVE

Modelagem dinâmica de carga, modelo estático ZIP, modelo dinâmico LINEAR (Australiano).

1.0 - INTRODUÇÃO

A atual estrutura do setor elétrico brasileiro impõe que a operação do sistema seja feita de forma a melhor explorar os recursos existentes ao menor preço possível. Dentro desta visão, torna-se necessário um profundo conhecimento da operação, dos ajustes e do desempenho de cada elemento do sistema, tanto isoladamente quanto em conjunto, visto que características de um elemento isolado podem se alterar diante da operação em conjunto.

A correta representação dos elementos de um sistema de potência sempre representou fator decisivo para a confiabilidade dos resultados de estudos elétricos, seja em regime permanente, seja em regime transitório. Em qualquer estudo de fluxo de potência é necessário definir-se inicialmente um modelo adequado para cada componente do sistema elétrico.

Ao longo do tempo vários estudos e pesquisas foram realizados com o propósito de aprimorar os modelos conhecidos, porém desde o início a carga do sistema apresentou-se como grande incógnita do problema. Apesar

de se conhecer como cada elemento da carga se comporta individualmente, não se tem uma idéia precisa da sua composição final, devido a grande diversidade de equipamentos que a compõem de forma aleatória.

Duas abordagens têm sido usadas para a modelagem de carga. A primeira delas é baseada no conhecimento dos componentes individuais e o modelo é obtido através da combinação de modelos dos diferentes componentes da carga. A segunda abordagem não requer o conhecimento das características físicas da carga. Esta se baseia em medidas obtidas da resposta da carga quando a mesma é submetida a distúrbios e o modelo é estimado usando métodos de identificação de sistemas.

Diante do exposto, torna-se imprescindível aprimorar a representação atual das cargas do sistema elétrico brasileiro. Neste sentido o ONS desenvolveu, em parceria com a UNIFEI, o projeto “Modelagem de Cargas para Estudos Dinâmicos” do Plano de Ação 2006 – 2008. Este projeto inclui o desenvolvimento de três equipamentos de medição específicos para colher dados do comportamento da carga, e de uma ferramenta computacional que viabiliza a análise desses dados e modelagem estática e dinâmica da carga. Desta forma, a partir das medições obtidas em campo é possível definir um modelo mais adequado e obter resultados mais próximos da realidade contribuindo para a melhoria da segurança do SIN.

Esse trabalho tem o objetivo de apresentar uma metodologia para determinação da melhor representação de carga em função da variação de tensão da rede, para que possa ser utilizada nos estudos de estabilidade transitória e dinâmica. Mais especificamente, melhorar a representação das cargas nos estudos de estabilidade dinâmica quando de grandes perturbações, a partir dos registros em campo do desempenho das cargas de diferentes regiões do SIN. Através de dados de medições realizadas em campo, são obtidos os modelos estáticos ZIP e dinâmico LINEAR referentes às cargas de diferentes tipos ramais alimentadores, e posteriormente é realizado um estudo comparativo entre as medidas de campo e o desempenho destes modelos.

2.0 - PROJETO DE MODELAGEM DE CARGA PARA ESTUDOS DINÂMICOS

Com objetivo de aprimorar a representação das cargas do sistema elétrico brasileiro, e por consequência melhorar a segurança do SIN, em 2003, o ONS deu início a um projeto de modelagem de carga para estudos dinâmicos, em parceria com a UNIFEI.

2.1 Desenvolvimento do Equipamento de Medição e do Programa Computacional

A primeira etapa deste projeto compreendeu uma análise detalhada dos modelos de carga existentes e utilizados nos programas de transitórios eletromecânicos, assim como o desenvolvimento de três equipamentos de medição específicos para colher dados de campo e de um programa computacional que permitisse a análise do comportamento da carga, para posterior definição de uma modelagem estática e dinâmica mais adequada da mesma. Na Figura 1 a seguir é apresentado um dos equipamentos desenvolvidos.



FIGURA 1 – Equipamento de Medição Desenvolvido.

No programa computacional desenvolvido foram implementadas as formulações matemáticas dos modelos de

carga estático polinomial (ZIP) e dinâmico australiano (LINEAR). O modelo ZIP foi escolhido por ser um modelo de uso tradicional de uso no setor elétrico, estando implementado em quase todos os programas de análise de sistemas. Já o modelo LINEAR foi escolhido por apresentar algumas características importantes, como flexibilidade e robustez, e também por poder ser implementado on-line. Outro fator é a similaridade entre o sistema de potência brasileiro e o australiano, conhecidos por possuírem centros de geração remotos, linhas de transmissão longas e uma configuração de rede radial.

A seguir será apresentada a formulação básica dos modelos ZIP e LINEAR.

(A) Modelo de Carga Estático Polinomial (ZIP)

O modelo ZIP possui a seguinte estrutura básica:

$$P(\bar{V}) = P_0 \left(a + b\bar{V} + c\bar{V}^2 \right) \quad \text{Equação 1-a}$$

$$Q(\bar{V}) = Q_0 \left(d + e\bar{V} + g\bar{V}^2 \right) \quad \text{Equação 1-b}$$

onde:

- V_0, P_0 e $Q_0 \rightarrow$ Condições iniciais da tensão e das potências ativa e reativa, respectivamente;
- $\bar{V} = \frac{V}{V_0} \rightarrow$ Desvio de tensão (alguns autores usam o $\Delta V = V(k+1) - V(k)$, onde k é o instante de tempo);
- a e $d \rightarrow$ Coeficientes (em pu) da parcela de potência constante;
- b e $e \rightarrow$ Coeficientes (em pu) da parcela de corrente constante;
- c e $g \rightarrow$ Coeficientes (em pu) da parcela de impedância constante;

Sendo que $a + b + c = 1$ e $d + e + g = 1$.

(B) Modelo Dinâmico Australiano (LINEAR)

O modelo LINEAR possui a seguinte estrutura básica:

$$P(k) = \sum_{i=1}^{n_p} a_i P_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_v} b_i V_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_f} c_i f_{k-i} \quad \text{Equação 2-a}$$

$$Q(k) = \sum_{i=1}^{n_q} d_i Q_{k-i} + \sum_{i=0}^{n'_v} e_i V_{k-i} + \sum_{i=0}^{n'_f} g_i f_{k-i} \quad \text{Equação 2-b}$$

onde:

- $P(k), Q(k) \rightarrow$ Resposta ativa e reativa da carga, respectivamente;
- $V_k, f_k \rightarrow$ Sinal de entrada observado na tensão e frequência, respectivamente;
- $a_i, b_i, c_i \rightarrow$ Coeficientes de regressão de P_i, V_i e f_i , respectivamente;
- $d_i, e_i, g_i \rightarrow$ Coeficientes de regressão de Q_i, V_i e f_i , respectivamente;
- $n_p, n_v, n_f, n_q, n'_v, n'_f \rightarrow$ Parâmetros das ordens de regressão do modelo, que são escolhidos pelo usuário.

2.2 Medições em Campo e Obtenção dos Modelos Correspondentes

Entre os anos de 2004 e 2006, foram monitorados e armazenados dados de eventos ocorridos em diferentes tipos de ramais alimentadores de carga de oito subestações do sistema elétrico brasileiro. Na Tabela 1 a seguir encontra-se um resumo dos pontos onde foram realizadas tais medições.

TABELA 1 – Subestações e Respective Ramais Onde Foram Realizadas Medições.

Subestação	Empresa	Tempo Monitorado	Tipo de Carga do Ramal Monitorado
SE Itajubá 3	CEMIG	74 dias	1 Ramal de Carga Mista
SE Ramon Rebert	CTEEP	97 dias	3 Ramais de Carga Mista
SE Taquaril	CEMIG	97 dias	1º Ramal: Carga Residencial
			2º Ramal: Carga Mista
			3º Ramal: Carga Industrial *
SE Fortaleza	CHESF	84 dias	1º Ramal: Carga Industrial + Residencial
			2º Ramal: Carga Industrial + Residencial
			3º Ramal: Carga Residencial + Comercial
SE Barreiras	CHESF	48 dias	3 Ramais de Carga Mista
SE Gravataí II	CEEE	41 dias	1º Ramal: Carga Industrial
			2º Ramal: Carga Residencial
			3º Ramal: Carga Industrial + Residencial
SE Joinville IV	CELESC	42 dias	1º Ramal: Carga Industrial
			2º Ramal: Carga Mista
			3º Ramal: Carga Residencial
SE Umbará	COPEL	44 dias	1º Ramal: Carga Comercial + Residencial
			2º Ramal: Carga Residencial + Industrial
			3º Ramal: Carga Industrial (Siderúrgica)

* Os eventos registrados para este alimentador foram desprezados devido a problemas de medição.

A partir dos eventos registrados pelos equipamentos instalados nestas subestações, foram obtidos os modelos estáticos ZIP e dinâmico LINEAR referentes às cargas de cada um dos ramais alimentadores monitorados.

Os dados de eventos medidos em cada ramal foram previamente divididos em dois grupos. O primeiro grupo, chamado de conjunto de treinamento, foi utilizado para obter os modelos de carga do respectivo alimentador. Já os dados do segundo conjunto, não pertencentes ao conjunto de treinamento, foram usados para verificar a resposta fornecida de cada modelo obtido.

Desta forma, foi realizado um estudo comparativo entre as medidas de campo e o desempenho dos modelos de carga estático ZIP e dinâmico LINEAR. Apenas com caráter ilustrativo no item 2.3 a seguir serão apresentados os resultados obtidos para o ramal de carga mista da SE Gravataí II.

2.3 Desempenho dos Modelos Para o Ramal de Carga Mista da SE Gravataí II

Através do programa desenvolvido, foram estimados os parâmetros do modelo estático polinomial (ZIP) e do Modelo Dinâmico Australiano (LINEAR) para o ramal de carga mista da SE Gravataí II. Os parâmetros obtidos no treinamento estão apresentados a seguir.

(A) Modelo de Carga Estático Polinomial (ZIP) Com Restrição

- a = 0.9999
- b = 1.5556E-10
- c = 7.7330E-11
- d = 0.9999
- e = 4.2299E-12
- g = 2.1011E-12

(B) Modelo Dinâmico Australiano (LINEAR)

- $a(1) = 1.0027$
- $a(2) = 0.0008$
- $a(3) = -0.0059$
- $b(0) = 1851.6040$
- $b(1) = -2430.0281$
- $b(2) = 362.6781$
- $b(3) = 249.1341$
- $c(0) = 0.4594$
- $c(1) = -1.2190$
- $c(2) = 0.4127$
- $c(3) = 0.3078$
- $d(1) = 0.9780$
- $d(2) = 0.0345$
- $d(3) = -0.0139$
- $e(0) = 1510.1292$
- $e(1) = -1621.2833$
- $e(2) = -69.0209$
- $e(3) = 184.2456$
- $g(0) = 0.3280$
- $g(1) = -0.0781$
- $g(2) = 0.1424$
- $g(3) = -0.3970$

Para simulação da resposta dos modelos, foi utilizado um evento registrado no dia 02/09/2006, às 12:39:02 horas, conforme apresentado nas Figuras 2-(a) e 2-(b) a seguir. Houve, no instante em que se iniciou o registro, uma variação de tensão de -2,6%, -0,1% na frequência, e -8,5% e -47,2% nas potências ativa e reativa, respectivamente.

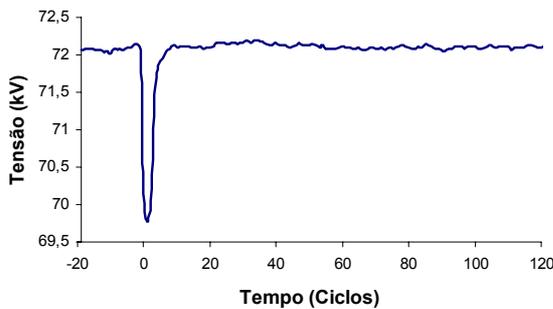


FIGURA 2-(a) Variação de Tensão Registrada.

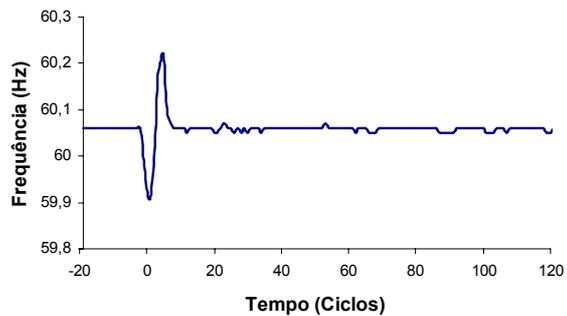


FIGURA 2-(b) Variação de Frequência Registrada.

Nos gráficos a seguir são apresentadas as comparações entre resposta fornecida pelos modelos e dados de medição, cujos valores foram obtidos pelo programa desenvolvido, através dos relatórios com dados tabulados das simulações.

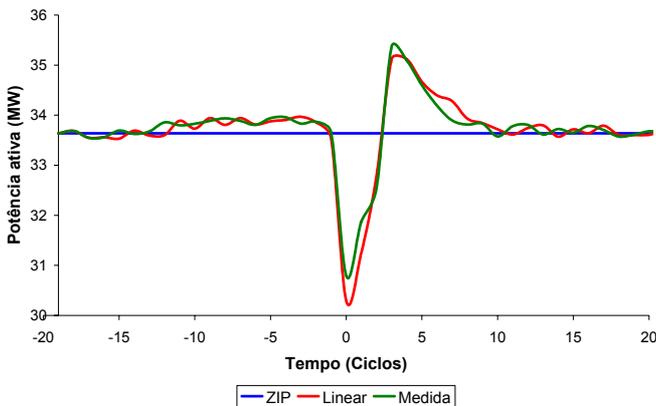


FIGURA 3-(a) Respostas da Potência Ativa (MW).

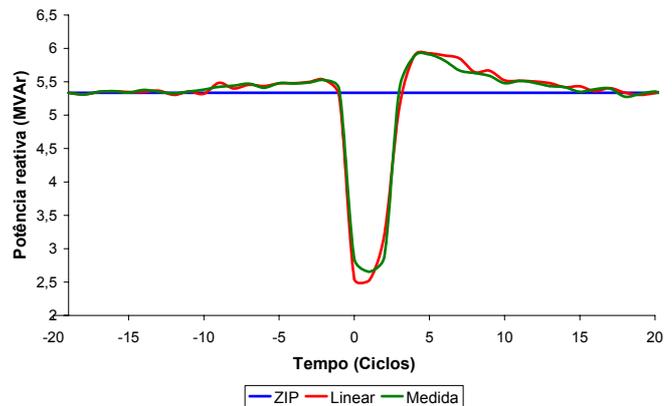


FIGURA 3-(b) Respostas da Potência Reativa (Mvar).

A partir das comparações entre os dados de medição e as respostas fornecidas pelos modelos pode-se verificar que, assim como para os demais ramais alimentadores, dos dois modelos estudados, o modelo LINEAR foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados da medição. Entretanto, vale ressaltar que a sua utilização ainda não é possível nos programas ANAREDE e ANATEM.

2.4 Resultados Obtidos Para o Modelo ZIP

Na Tabela 2 a seguir são apresentados, para todos os pontos onde foram realizadas medições, os resultados obtidos para o modelo ZIP.

TABELA 2 – Resultados Obtidos Para o Modelo ZIP.

Subestação	Tipo de Carga do Ramal Monitorado	Nº de Eventos para Treinamento	Resultados Obtidos	
			Potencia Ativa	Potência Reativa
SE Itajubá 3	1 Ramal de Carga Mista	10	0,60 I cte + 0,40 Z cte	Q cte
SE Ramon Rebert	1º Ramal: Carga Mista	10	0,98 P cte + 0,02 Z cte	Z cte
	2º Ramal: Carga Mista	10	P cte	Q cte
	3º Ramal: Carga Mista	10	Z cte	Z cte
SE Taquaril	1º Ramal: Carga Residencial	10	P cte	Z cte
	2º Ramal: Carga Mista	10	P cte	Q cte
SE Fortaleza	1º Ramal: Carga Industrial + Residencial	10	P cte	Z cte
	2º Ramal: Carga Industrial + Residencial	10	P cte	Z cte
	3º Ramal: Carga Residencial + Comercial	10	Z cte	Z cte
SE Barreiras	1º Ramal: Carga Mista	10	P cte	Z cte
	2º Ramal: Carga Mista	10	Z cte	Z cte
	3º Ramal: Carga Mista	10	P cte	Z cte
SE Gravataí II	1º Ramal: Carga Industrial	03	P cte	Z cte
	2º Ramal: Carga Residencial	10	Z cte	Q cte
	3º Ramal de Carga Industrial + Residencial	09	P cte	Q cte
SE Joinville IV	1º Ramal: Carga Industrial	10	P cte	Q cte
	2º Ramal: Carga Mista	10	P cte	Q cte
	3º Ramal: Carga Residencial	10	Z cte	Q cte
SE Umbará	1º Ramal: Carga Comercial + Residencial	10	Z cte	Q cte
	2º Ramal: Carga Residencial + Industrial	10	P cte	Q cte
	3º Ramal: Carga Industrial (Siderúrgica)	10	Z cte	Z cte

Para os dois primeiros alimentadores da **SE Fortaleza** a potência ativa apresentou um comportamento do tipo P constante, característica esta que se adapta para cargas cuja composição é predominantemente industrial. Já a potência reativa destes ramais resultou em uma característica do tipo Z constante. Vale ressaltar que, segundo Araújo [15], o comportamento da potência reativa nas cargas industriais depende de vários fatores, como por exemplo, o carregamento dos motores. Para o último ramal desta subestação obteve uma resposta do tipo Z constante, comportamento este típico de uma carga residencial.

A escassez de dados dificultou a modelagem do ramal industrial da **SE Gravataí II**, deixando o modelo obtido sem aderência. Neste caso foram considerados apenas três eventos para o treinamento do modelo, quando normalmente são utilizados mais de dez eventos.

Os dois primeiros alimentadores da **SE Joinville IV** mostraram uma tendência predominante de carga industrial (P e Q cte) enquanto que o terceiro alimentador apresentou um desempenho típico de carga residencial (Z e Q cte), correspondendo assim as informações fornecidas pela CELESC.

A resposta do modelo ZIP para os ramais de carga do tipo Comercial + Residencial e Industrial (siderúrgica) da **SE Umbará** resultaram dentro do esperado, tendo em vista as características das cargas alimentadas. Já o ramal alimentador da carga tipo Residencial + Industrial resultou em uma característica P e Q constante, mostrando assim uma tendência predominante de carga do tipo industrial (P e Q cte).

3.0 - CONCLUSÕES

Com base nas respostas fornecidas pelos modelos, para todos os ramais monitorados o modelo LINEAR apresentou desempenho mais próximo dos dados da medição. Vale ressaltar que a utilização deste modelo ainda não é possível nos programas ANAREDE e ANATEM. Diante deste fato, o ONS solicitará ao CEPEL que analise a viabilidade de se incorporar este modelo nas ferramentas computacionais em questão.

A quantidade de eventos registrados é de fundamental importância para se obter um modelo com maior robustez e conseqüentemente melhorar o desempenho do mesmo. Desta forma, uma maior quantidade de dados relacionados a testes programados ou a distúrbios naturais que afetam o sistema e a carga ajudará no aprimoramento dos modelos de carga.

Os resultados apresentados neste artigo são frutos do Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos” do Plano de Ação do ONS que foi desenvolvido pelo ONS em parceria com a UNIFEI. Um dos maiores ganhos deste projeto é a viabilidade de se realizar medidas em campo, a partir das quais podem ser obtidos modelos de carga mais próximos da realidade.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **UNIFEI, 2003.** *RT-01 – Estado da Arte em Modelagem Dinâmica de Carga*, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos”;
- [2] **UNIFEI, 2004.** *RT-02 – Análise dos Elementos Influentes na Modelagem Dinâmica de Carga*, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos”;
- [3] **UNIFEI, 2004.** *RT-04 – Desenvolvimento de Modelos Dinâmicos de Carga*, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos”;
- [4] **UNIFEI, 2004.** *RT-05 – Programa Computacional para a Obtenção dos Modelos de Carga*, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos”;
- [5] **UNIFEI, 2005.** *RT-06 – Medição em Campo e Análise de Dados*, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos”;
- [6] **UNIFEI, 2005.** *RT-09 - Modelos Dinâmicos de Carga com os Dados Registrados em Campo na SE Ramon Reberte Filho 88Kv*, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos”;
- [7] **UNIFEI, 2006.** *RT -11- Modelos Dinâmicos de Carga com os Dados Registrados em Campo na SE Taquaril 69 kV*, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos”;
- [8] **UNIFEI, 2006.** *RT-02 - Modelos Dinâmicos de Carga com os Dados Registrados em Campo na Subestação FTZ – Fortaleza 69 kV*, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos”;
- [9] **UNIFEI, 2006.** *RT-04 - Modelos Dinâmicos de Carga com os Dados Registrados em Campo na Subestação BRA – Barreiras 138/69kV*, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos”;

- [10] **UNIFEI, 2006.** *RT-06 - Modelos Dinâmicos de Carga com os Dados Registrados em Campo na Subestação Gravataí II 230/69 kV*, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos”;
- [11] **UNIFEI, 2006.** *RT-08 - Modelos Dinâmicos de Carga com os Dados Registrados em Campo na Subestação Joinville IV*, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos”;
- [12] **UNIFEI, 2006.** *RT-10 - Modelos Dinâmicos de Carga com os Dados Registrados em Campo na Subestação Umbará*, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos”;
- [13] **T. Dovan**, T.S. Dillon, C.S. Berger e E.E. Forwar. *A Microcomputer Based On-Line Identification Approach to Power System Dynamic Load Modelling*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-2, nº 3, agosto de 1987, páginas 529 a 536;
- [14] **Souza, M. M. P. de**, 2006. *Modelagem de Carga*, Monografia de Pós-Graduação, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Novembro;
- [15] **Araújo, A.**, 1974. *Modelos Representativos da Carga em Estudos de Estabilidade*, Tese de Livre Docência, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Maio.