Modelagem de um Sistema de Distribuição com Geração utilizando Algoritmo Genético

Igor Ferreira Visconti*. Delberis Araujo Lima.**

**Pontifícia Universidade Católica (PUC-Rio) e Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL)
Rio de Janeiro, RJ - Brasil (Tel: +55-21-25986149; e-mail: igor@cepel.br).
** Pontifícia Universidade Católica (PUC-Rio), Rio de Janeiro, RJ (e-mail:
delberis@ele.puc-rio.br)*

Abstract: Electromechanical transient studies analyze the ability of a given power system to reach a new equilibrium point after a disturbance. Traditionally, power system loads are the greatest source of imprecision, depending on its composition of energy consuming equipment that are connected or disconnected from the system throughout the day, week and year. For transmission utilities, the distribution systems represent the loads to be fed. However, details of the topology of distribution systems, where some of them have distributed generation, are often not available or are not updated in the database of transmission companies interested in obtaining accurate results of electromechanical transient simulations. This article presents a methodology for obtaining load models based on measurements, which estimates load equivalents for dynamic simulations of the operation of the national interconnected system. The methodology is valid for systems with and without distributed generation and requires data recorded at the common coupling point between transmission and distribution companies.

Resumo: Estudos de transitórios eletromecânicos analisam a capacidade de um dado sistema elétrico de potência atingir um novo ponto de equilíbrio após um distúrbio. Tradicionalmente, as cargas de um sistema de potência são os elementos de maior imprecisão, em função da sua composição de equipamentos consumidores de energia que são ligados ou desligados do sistema ao longo do dia, da semana e do ano. Para as concessionárias de transmissão, os sistemas de distribuição representam as cargas a serem atendidas. Entretanto, os detalhes da topologia dos sistemas de distribuição, onde alguns deles possuem geração distribuída, frequentemente não estão disponíveis ou não estão atualizados no banco de dados de empresas de transmissão interessadas em obter resultados precisos de simulações de transitórios eletromecânicos.

O presente artigo apresenta uma metodologia para obtenção de modelos de cargas baseados em medições, que estima equivalentes de cargas para simulações dinâmicas da operação do sistema interligado nacional. A metodologia é válida para sistemas com e sem geração distribuída e necessita de dados registrados no ponto de acoplamento comum entre as empresas de transmissão e de distribuição.

Keywords: Genetic Algorithm, Load Modeling, Power Quality, Transient Stability, Identification of Systems, Voltage Sags.

Palavras-chaves: Algoritmo Genético, Modelagem de Carga, Qualidade de Energia, Estabilidade Transitória, Identificação de Sistemas, Quedas de Tensão.

1. INTRODUÇÃO

A operação estável de um sistema elétrico de potência depende da sua capacidade de combinar continuamente a geração com a demanda [1] de modo eficiente, tanto tecnicamente quanto economicamente. As características de carga e a severidade de desvios de tensão e frequência de seus valores nominais impactam a dinâmica do sistema de potência, influenciando a estabilidade angular e de tensão, o amortecimento do sistema e as oscilações entre áreas. Modelos de cargas muito otimistas são aqueles que em simulações dinâmicas de faltas num sistema elétrico de potência subestimam o real impacto da contingência no barramento de carga, podendo comprometer a segurança do sistema, já que os resultados de tal simulação apresentaria margens de estabilidade maiores do que as

condições operativas reais impõem; por outro lado, modelos de cargas pessimistas superestimam o real impacto de um distúrbio no ponto de operação do barramento de carga, consequentemente levando a restrições conservadoras quanto à capacidade de transferência de energia em linhas de transmissão [2]

Apesar da importância na análise da estabilidade do sistema, modelos estáticos genéricos ainda são utilizados para a representação matemática das cargas em simulações dinâmicas, de acordo com o levantamento apresentado em [3]. O advento de novos equipamentos eletrônicos supridos pela distribuição e o crescimento da geração distribuída na média e baixa tensão sugerem a necessidade de uma revisão nos modelos utilizados para representar essa complexa agregação

de componentes passivos (cargas consumidoras) e ativos (geração distribuída) que caracterizam as redes de distribuição ativas.

Este artigo apresenta na seção 2 uma metodologia para modelagem de cargas, a partir de dados de medição (*measurement-based load modeling*). A motivação do trabalho consiste tanto em descrever um procedimento sistemático para atualizar os modelos de cargas supridas pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), quanto para transformar dados medidos em informação consistente para estudos da operação e planejamento de sistemas. São descritos os passos principais, desde a escolha de um modelo, passando pela estimação de parâmetros do modelo utilizando um algoritmo genético, incluindo a definição do espaço de busca de soluções do problema. Na seção 3 é apresentada uma aplicação de modelagem de um sistema de distribuição real, com geração local, para ser utilizado em simulações dinâmicas. Os dados de tensão e corrente para representar este modelo de carga equivalente foram coletados no ponto de acoplamento comum entre a transmissão e a distribuição. A validação do modelo estimado foi feita através de uma implementação do mesmo num programa de análise de transitórios eletromecânicos (ANATEM), simulando uma falta originada na transmissão, que reproduz o afundamento de tensão registrado pelo medidor, apresentando qualitativamente o comportamento real da carga durante e após a duração da contingência. Foi feita a comparação com o modelo estático de impedância constante, que por sua vez apresentou limitações que mereceram destaque. A seção 4 apresenta as conclusões do trabalho.

2. MODELOS DE CARGAS BASEADOS EM MEDIÇÕES

Modelos de cargas baseados em medições são estimados a partir de afundamentos de tensão causados por distúrbios originados a montante do medidor. A Fig. 1 ilustra a localização do medidor, cujos dados de interesse são aqueles que registram a resposta de carga para contingências originadas na transmissão. Diferentes dispositivos de aquisição de dados, como medidores de qualidade de energia, registradores de perturbações digitais e PMUs podem ser usados para estimar modelos de cargas baseados em medição.

Fig. 1 – Ilustração do local de instalação do medidor de perturbações no PAC entre transmissão e distribuição.

As respostas das cargas são registradas e usadas para derivar uma representação matemática equivalente, tipicamente relacionando desvios de potência causados por desvios de tensão. A ideia central da metodologia proposta para modelagem de cargas é inspirada na identificação de sistemas, que consiste num procedimento para estimar modelos matemáticos paramétricos através da medição de pares de dados de entrada e saída [4] [5]. Os modelos podem ser

formulados como equações diferenciais, equações a diferenças, funções de transferência e espaço de estados.

Os principais conceitos de identificação de sistemas aplicados à metodologia de modelagem de carga baseada em medições são listados abaixo:

- **Selecionar dados de entrada e saída do modelo.** – o modelo de carga deseja mapear os desvios de potência ativa e reativa causados por desvios da tensão no barramento de carga; há medidores que registram valores instantâneos de tensão e corrente, sendo necessário um processamento de sinais para obter os valores eficazes e fundamentais da potência e tensão; a qualidade do sinal depende da taxa de amostragem do medidor, assim como o distúrbio deve ter critérios de duração e severidade para serem escolhidos, de acordo com a análise a que se propõe o modelo.
- **Escolher uma estrutura matemática (modelo) parametrizável** – há uma extensa literatura de modelos matemáticos parametrizáveis utilizados para representar cargas agregadas em análise de sistemas [3] [5] [6]. A escolha pode ser pautada por tipo de estudo, disponibilidade na biblioteca de modelos do *software* de simulação, pelo significado físico do modelo, por comparação entre um ou mais modelos, por facilidade de implementação ou por questões de convergência da simulação.
- **Estimar os parâmetros do modelo a partir de dados reais** – Esse processo tipicamente envolve diferentes heurísticas de otimização, onde formula-se a função objetivo a ser minimizada como o erro entre a resposta da carga medida e a resposta do modelo simulada.

- **Validação do modelo** – Esta etapa pode ser feita submetendo o modelo (estimado a partir de um conjunto de dados de treinamento) a um outro conjunto de dados medidos (dados de validação). No presente artigo, a validação foi feita qualitativamente através da simulação no ANATEM, cujos resultados serão mostrados adiante.

A seguir, serão apresentadas estas etapas.

2.1 – Seleção e processamento de dados

O medidor utilizado registrou dados instantâneos de tensão e corrente antes, durante e depois de afundamentos de tensão abaixo de 0,9 p.u. A taxa de amostragem de 1920 Hz corresponde a 32 pontos por ciclo de 60 Hz. Para se obter os dados das potências ativas e reativas foram seguidos os seguintes passos no processamento dos sinais de tensão e corrente ([3] [5] [7]), resumidos na Fig. 2:

A Transformada Discreta de Fourier (TDF) [8] foi aplicada nos sinais das três fases de tensões e correntes, através de uma janela deslizante, de modo que foram extraídas as componentes fundamentais fasoriais das três fases de tensões e correntes, antes, durante e depois da eliminação do afundamento de tensão. A partir dos fasores de tensões e correntes foram obtidas as componentes de sequência de Fortescue [1], uma vez que as análises de transitórios eletromecânicos utilizam somente as componentes de sequência positiva. Finalmente, a partir das componentes de sequência positiva foram obtidas as componentes real e

imaginária da potência aparente, isto é as potências ativa e reativa.

Fig. 2 – Processamento de sinais de tensão e corrente medidos, para serem utilizados na modelagem de carga.

Portanto, as relações que se deseja modelar são P_1 (componente de sequência positiva da potência ativa) em função de V_1 (componente de sequência positiva da tensão), e as curvas Q_1 (componente de sequência positiva da potência reativa) em função de V_1 .

2.2 – Escolha do Modelo de Carga

Modelos de carga podem ser classificados como estáticos ou dinâmicos, onde os primeiros expressam as potências ativa e reativa, em qualquer instante do tempo, em função de desvios de tensão do barramento de carga e opcionalmente em função também de desvios da frequência elétrica do sistema, naquele instante, enquanto modelos dinâmicos expressam as potências ativa e reativa, em qualquer instante do tempo, em função da magnitude de tensão do barramento de carga e da frequência elétrica do sistema naquele instante e nos instantes anteriores. Outras classificações possíveis consistem no número de entradas e saídas, sendo a escolha definida neste trabalho como um modelo de entrada e saída únicas (Single-Input Single-Output – SISO), o que implica em desprezar o efeito das variações de frequência na resposta das cargas.

O modelo dinâmico proposto é formulado em (1) e em [11] é chamado de modelo autorregressivo (*autoregressive with an extra input*, ARX [4] e [5]). Este modelo é uma combinação linear de valores passados de potência e de tensão, além do valor atual da tensão.

$$P(t) = P_0 \left[\sum_{m=1}^{m=M_p} \omega_{mp} \frac{P(t-m\Delta t)}{P_0} + \sum_{k=0}^{k=K_p} \omega_{kvp} \frac{V(t-k\Delta t)}{V_0} \right] \quad (1)$$

$$Q(t) = Q_0 \left[\sum_{m=1}^{m=M_q} \omega_{mq} \frac{Q(t-m\Delta t)}{Q_0} + \sum_{k=0}^{k=K_q} \omega_{kvq} \frac{V(t-k\Delta t)}{V_0} \right]$$

Onde:

- M_p, K_p, M_q, K_q – Definem a ordem do modelo, e neste trabalho, a escolha foi $M_p = K_p = M_q = K_q = 2$, caracterizando o modelo linear escolhido como de 2ª ordem. Logo, m e k variam de 1 a 2 e de 0 a 2, respectivamente.

- V_0, P_0, Q_0 , são respectivamente as amostras de tensão, potências ativa e reativa em regime permanente, isto é, correspondem ao ponto de operação antes da ocorrência de um distúrbio capaz de causar um afundamento de tensão no barramento de carga sob análise.

- $\omega_{1p}, \omega_{2p}, \omega_{0vp}, \omega_{1vp}, \omega_{2vp}, \omega_{1q}, \omega_{2q}, \omega_{0vq}, \omega_{1vq}, \omega_{2vq}$ são os parâmetros a serem estimados, tanto para o modelo discreto da potência ativa, quanto para o modelo discreto da potência reativa.

- Δt – é o inverso da taxa de amostragem (*sampling rate*) do medidor, isto é o período de intervalo entre as amostras da medição. Assim, para uma taxa de amostragem de 1920Hz, a diferença entre a amostra atual $V(t)$ e a imediatamente anterior $V(t-1)$ é de 1/1920 segundos, isto é cerca de 0.52ms.

- $P(t), P(t-\Delta t), P(t-2\Delta t), V(t), V(t-\Delta t), V(t-2\Delta t)$ – correspondem às amostras de potência e tensão do “instante atual” t e às amostras imediatamente anteriores.

As equações seguintes serão apresentadas apenas para a potência ativa, sendo a formulação para a potência reativa idêntica, mudando apenas as variáveis análogas.

Como condição de contorno do problema, por definição, $P(t=0)=P_0, Q(t=0)=Q_0$ e $V(t=0)=V_0$. Logo, a primeira restrição linear dos parâmetros do modelo (1) é dada por (2):

$$\omega_{1p} + \omega_{2p} + \omega_{0vp} + \omega_{1vp} + \omega_{2vp} = 1 \quad (2)$$

Aplicando a transformada Z ([8] [11] em (1) resulta na formulação do modelo de carga em termos de funções de transferência. A Tabela 1 mostra as funções de transferência tanto no domínio de tempo discreto, quanto no domínio de tempo contínuo.

Tabela 1 – Representações do modelo proposto através de funções de transferência equivalentes

Funções de transferência	
$H(z)$ – tempo discreto	$H(s)$ – tempo contínuo
$\frac{P(z)}{V(z)} = \frac{P_0}{V_0} \left[\frac{\omega_{0vp}z^2 + \omega_{1vp}z + \omega_{2vp}}{z^2 - \omega_{1p}z - \omega_{2p}} \right]$	$\frac{P(s)}{V(s)} = \frac{P_0}{V_0} \left[\frac{\alpha_{0vp}s^2 + \alpha_{1vp}s + \alpha_{2vp}}{s^2 + \alpha_{1p}s + \alpha_{2p}} \right]$
OU	OU
$\frac{P(z)}{V(z)} = \frac{P_0}{V_0} \left[\frac{(z + r_{z1p})(z + r_{z2p})}{(z + p_{z1p})(z + p_{z2p})} \right]$	$\frac{P(s)}{V(s)} = \frac{P_0}{V_0} \left[\frac{(s + r_{s1p})(s + r_{s2p})}{(s + p_{s1p})(s + p_{s2p})} \right]$

Onde:

- $\alpha_{1p}, \alpha_{2p}, \alpha_{0vp}, \alpha_{1vp}, \alpha_{2vp}$ são os parâmetros a serem estimados para a função de transferência no domínio do tempo contínuo da potência ativa.

- $V(s), P(s), Q(s)$ são os sinais de tensão, potências ativa e reativa filtrados pela transformada de Laplace ([8] [11] A correspondência entre as formulações pode ser obtida através da transformada de Tustin [12] .

- $V(z), P(z), Q(z)$ são os sinais de tensão, potências ativa e reativa, após a transformada Z. O sinal de tensão é sempre medido, e constitui a variável de perturbação dos modelos.

- r_{z1p} e r_{z2p} são os zeros da função de transferência $H(z)$, enquanto p_{z1p} e p_{z2p} são os polos de $H(z)$; analogamente, r_{s1p} e

r_{s2p} são os zeros da função de transferência $H(s)$, enquanto p_{s1p} e p_{s2p} são os polos de $H(s)$.

O modelo ARX proposto em (1) e as funções de transferência da Tabela 1 são equivalentes, levando em consideração que a conversão entre os domínios contínuo e discreto estão associadas ao período de amostragem dos sinais de entrada e saída do sistema, isto é, durante esse período entre amostras, assume-se que os valores dos sinais são constantes. Numa simulação de transitórios eletromecânicos que utilize estes modelos, o passo de integração da simulação deve ser menor do que esse período de amostragem.

2.3 – Estimação de parâmetros com Algoritmo Genético

Algoritmo Genético (AG) pode ser definido como uma estratégia de busca de soluções inspirada na teoria da evolução de Charles Darwin [13]. O processo de otimização a partir de AG pode ser resumido nos seguintes passos:

- **A solução para o problema de otimização deve ser codificada** – o exemplo mais didático da codificação da solução de um problema de otimização utilizando AG consiste em codificar um número inteiro numa representação binária; neste caso, a solução numérica a ser buscada pelo AG seria traduzida em um vetor de 0s e 1s. Este vetor, tomando emprestada a terminologia da teoria da evolução de Darwin, seria o *cromossoma* do AG (ou *indivíduo* de uma *população* de soluções). A Tabela 2 apresenta os parâmetros do modelo ARX formulado em (1) e os parâmetros para cada uma das duas possíveis formulações equivalentes através de funções de transferência, tanto contínua quando discreta, formuladas na Tabela 1. Os parâmetros são números reais, exceto na codificação dos parâmetros em termos de zeros e polos, que podem assumir a forma de números complexos.

Tabela 2. Diferentes codificações dos parâmetros do modelo proposto

ARX	$\theta_p = [\omega_{1p}, \omega_{2p}, \omega_{0vp}, \omega_{1vp}]$
$H(z) = \frac{P(z)}{V(z)}$	$\theta_p = [\omega_{1p}, \omega_{2p}, \omega_{0vp}, \omega_{1vp}]$ ou $\theta_p = [r_{z1p}, r_{z2p}, p_{z1p}, p_{z2p}]$
$H(s) = \frac{P(s)}{V(s)}$	$\theta_p = [\alpha_{0vp}, \alpha_{1vp}, \alpha_{2vp}, \alpha_{1p}]$ ou $\theta_p = [r_{s1p}, r_{s2p}, p_{s1p}, p_{s2p}]$

Onde:

θ_p – conjunto de parâmetros a ser estimado pelo AG, de acordo com a escolha do modelo. Os parâmetros ω_{2vp} e α_{2p} não foram incluídos porque $\omega_{2vp} = 1 - \omega_{1p} - \omega_{2p} - \omega_{0vp} - \omega_{1vp}$ e, aplicando a transformada de Tustin em $H(z)$ com as condições de contorno (2) resulta sempre em $\alpha_{2p} = \alpha_{2vp}$.

- **Cria-se uma população de soluções para o problema, sujeitas a restrições lineares e/ou não lineares** – o programador deve estabelecer uma rotina computacional para gerar uma *população* (conjunto de *indivíduos* ou *cromossomas*), onde cada elemento (ou *gene*) do *cromossoma* deve respeitar eventuais limites inferiores e superiores que

cada *gene* pode assumir. Para o modelo ARX escolhido e seus equivalentes, a Tabela 3 apresenta as restrições que os parâmetros devem respeitar [11], definindo assim o espaço de busca de soluções do problema.

Tabela 3. Equações e inequações lineares de restrição ao espaço de busca de soluções

ARX	$\omega_{2vp} = 1 - (\omega_{1p} + \omega_{2p} + \omega_{0vp} + \omega_{1vp})$ e $-1 < \omega_{2p} < 1$ e $\omega_{2p} - \omega_{1p} < 1$ e $\omega_{2p} + \omega_{1p} < 1$
$H(z)$	$ p_{z1p} < 1$ e $ p_{z2p} < 1$
$H(s)$	$\text{Re}\{p_{s1p}\} < 0$ e $\text{Re}\{p_{s2p}\} < 0$

- **Definem-se operadores de seleção, combinação e mutação** – A probabilidade de seleção de *indivíduos* entre *gerações* é proporcional à “aptidão do indivíduo”, isto é, as melhores soluções têm maiores chances de serem utilizadas na próxima iteração. O *crossover* combina dois indivíduos diferentes de uma *geração*, por exemplo, com dois elementos de um indivíduo e dois elementos de outro, para criar um novo *indivíduo* fruto deste *crossover* para a próxima *geração*. A *mutação* modifica um *gene* de um *cromossoma* de uma geração (respeitando os limites e outras restrições estabelecidas) para a *geração* seguinte. O programador deve decidir o percentual de *indivíduos* de uma *população* que serão fruto de *crossover* e *mutações* de *indivíduos* da geração anterior.

- **Determina-se uma função objetivo ou de avaliação** – é o mecanismo de avaliação da solução do problema de otimização codificada em cada *indivíduo* da *população* de soluções. Tipicamente, a função objetivo é uma medida de erro (erro médio quadrático, norma euclidiana) entre a medição e a simulação, isto é, a partir de uma curva de potência medida, compara-se cada amostra da curva medida com o resultado da curva simulada pelo modelo parametrizado por um indivíduo da população, o que significa que a cada geração (iteração AG), todos os *indivíduos* são avaliados e os “mais aptos” tem “maior chance de sobrevivência”. A eq. (4) apresenta a função objetivo utilizada para cálculo do erro entre a potência ativa medida e simulada.

$$F_{obj}(\theta_p) = \frac{1}{N} \sum_{ev=1}^N \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left(\frac{P_{med}(ev, t) - P_{calc}(ev, t, \theta_p)}{P_{med}(ev, t, \theta_p)} \right)^2 \quad (4)$$

Onde:

- P_{med} , P_{calc} – são, respectivamente, os dados de potência medida e calculadas pelo modelo.
- ev – é o índice do evento, por definição consiste em um conjunto de amostras de potência e tensão antes, durante e depois de um desvio de tensão maior $V(t)/V_0 < 0,9$ p.u.
- n – é o número de amostras de um evento ev .
- N – é o número total de eventos ev , selecionados como dados de treinamento.

A seguir, a Fig. 3 e a Fig. 4 ilustram a estimativa de parâmetros do modelo (1) para representar 4 eventos ($N=4$) com o mesmo

conjunto de parâmetros. A Fig. 3 apresenta o resultado do melhor *cromossoma* da 1ª geração do AG, enquanto a Fig. 4 apresenta o resultado do melhor *cromossoma* para a 20ª geração

Fig. 3 – Melhor solução da 1ª iteração do AG para modelar 4 eventos.

Fig. 4 – Melhor solução após 20 iterações do AG para modelar os mesmos 4 eventos.

3. RESULTADOS

3.1 Modelagem de um sistema de distribuição com geração

Esta seção utilizará o registro de um distúrbio originado na transmissão e medido no lado de baixa de um transformador T/D (Fig. 1), que separa uma empresa de transmissão do SIN de uma empresa de distribuição, que possui dois geradores térmicos de 111MW e 30 MW. De acordo com o relatório de ocorrências da transmissora, o distúrbio foi causado por uma descarga atmosférica, que desligou uma linha do sistema de transmissão bem próxima ao transformador que tinha o medidor instalado. A Fig. 5 e a Fig. 6 apresentam a potência medida (curva vermelha), a potência simulada pelo modelo com parâmetros estimados (curva azul) e a potência simulada pelo modelo de carga impedância constante (curva verde), adotado pelo ONS para este sistema de distribuição conectado ao SIN. Tanto a resposta do modelo estimado, quanto a do modelo de impedância constante foram calculados a partir dos dados de tensão medida. A estimação dos parâmetros foi feita de forma a minimizar o erro entre a potência medida potência simulada pelo modelo proposto. Observa-se, após a eliminação da falta pela proteção, uma oscilação

eletromecânica amortecida, interpretada como a aceleração e desaceleração das máquinas do sistema de distribuição em relação à frequência síncrona do sistema, diferente de sistemas de distribuição sem geração própria.

Fig. 5 - Estimação de Parâmetros para a potência ativa (P).

Fig. 6 - Estimação de Parâmetros para a potência reativa (Q)

A solução final estimada pelo AG para a potência ativa resultou em uma função de transferência $H_p(s)$ com polos complexos, que foi capaz de reproduzir a oscilação amortecida após a eliminação do defeito. Estes resultados mostram o quão distante podem ser os resultados de uma simulação com a modelagem de carga muito genérica. Em [1] esta representação de impedância constante (curva verde) seria considerada uma modelagem de carga muito otimista. Já a solução final estimada pelo AG para a potência reativa ilustrou uma impossibilidade matemática do modelo de impedância constante: durante o afundamento, a potência reativa assume valores negativos (uma inversão de fluxo), o que seria impossível representar em um modelo que formula a resposta da potência reativa proporcional ao quadrado dos desvios de tensão.

A fim de verificar a eficácia desta modelagem foram estimados modelos para mais de 30 sistemas de distribuição próximos ao local do distúrbio descrito acima. Todos estes modelos de carga, tanto para potência ativa, quanto para a potência reativa, foram implementados no ANATEM [14], aplicativo computacional desenvolvido pelo CEPEL e utilizado no setor elétrico brasileiro para análise de transitórios eletromecânicos. Os dados de entrada do programa com todos os elementos da rede básica do SIN estão disponibilizados no formato do ANATEM pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). No entanto, os sistemas de distribuição conectados ao SIN através

de barras de 69 kV não têm as suas topologias detalhadas, são representados com modelos ZIP [2]. Assim sendo, foi feita uma simulação de curto-circuito e abertura de linha, próximos ao mesmo transformador citado anteriormente. A resposta do modelo impedância constante é comparada com as funções de transferência estimadas e apresentadas na Fig. 5 e na Fig. 6. Os resultados do ANATEM aparecem na Fig. 7 e na Fig. 8. Percebe-se qualitativamente que a resposta ao afundamento de tensão dos modelos de carga baseados em medição é muito mais próxima do que foi medido do que a resposta do modelo de impedância constante.

Fig. 7 - Potência Ativa simulada na barra de 69 kV com Z constante (P_{zip}) e com o modelo estimado (P_{arx})

Fig. 8 - Potência Reativa simulada na barra de 69 kV com Z constante (Q_{zip}) e com o modelo estimado (Q_{arx})

4. CONCLUSÕES

Estimar modelos a partir de observações de fenômenos naturais é uma das tarefas primordiais do método científico. Este trabalho descreve uma metodologia de modelagem de cargas que pode contribuir para a obtenção de resultados mais precisos nas simulações de transitórios eletromecânicos. No entanto, ao referenciar as etapas principais da identificação de sistemas como fundamento da metodologia, há o intuito de apresentar um procedimento genérico para modelagem em outras aplicações que disponham de dados medidos da entrada e saída de um sistema de interesse.

O algoritmo genético foi utilizado pela sua simplicidade de implementação e também por ser menos sensível a inicialização do problema, isto é, não há necessidade de se determinar quais devem ser os valores iniciais da população de indivíduos, desde que as restrições sejam respeitadas.

Para redes de distribuição ativas com geração térmica, foi preciso restringir o espaço de buscas dos polos da função de transferência $H(s)$ para números complexos (cuja

transformada inversa de Laplace resulta em uma senóide de amplitude decrescente). Portanto, merece destaque que não basta seguir os passos da identificação de sistemas, é preciso que o especialista entenda a natureza do sistema que se deseja modelar, analise graficamente os dados de entrada e saída típicos do sistema, e busque definir o espaço de buscas de soluções de modo a auxiliar a convergência do processo de otimização da estimação de parâmetros.

5. REFERÊNCIAS

- [1] P. Kundur, "Power System Stability and Control", Electric Power Research Institute, McGraw-Hill, USA, 1994.
- [2] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Load Representation for Dynamic Performance Analysis (1993)", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 2, pp. 472-482.
- [3] CIGRE Working Group C4.605, "Modeling and aggregation of loads in flexible power networks", 2013.
- [4] L. Ljung, "System Identification — Theory For the User", 2nd ed., PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 1999.
- [5] A. Maitra, *et al.*, "Using System Disturbance Measurement Data to Develop Improved Load Models", in *Proceedings of the IEEE Power Systems Conference and Exposition*, 2006.
- [6] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. "Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation", *IEEE Trans. on Power Systems*, February, 1995, vol.10, No.1, pp.523-538.
- [7] C.-Y., Chiou, *et al.*, "Development of a Micro-processor-based Transient Data Recording System for Load Behavior Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, No. 1, February, 1993.
- [8] A. V. Oppenheim *et al.*, "Discrete-time signal processing", 2nd ed., New Jersey: Prentice Hall Inc., 1999.
- [9] I. F. Visconti, D. A., Lima, *et al.*, "Measurement-Based Load Modeling Using Transfer Functions for Dynamic Simulations", *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 29, p. 111-120, 2014.
- [10] E. O. Kontis, T. A. Papadopoulos, *et al.*, Measurement-Based Dynamic Load Modeling Using the Vector Fitting Technique, *IEEE Transactions On Power Systems*, Vol. 33, No. 1, January 2018.
- [11] G. Box, G. Jenkins, "Time Series Analysis: Forecasting & Control", Prentice Hall Inc., 1994.
- [12] H.-D. Chuang, J.-C. Wang, "Development of a dynamic ZIP-motor load model from on-line field measurements", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 19, No 7, 1997.
- [13] Z. Michalewicz, "Genetic algorithms + data structures = evolution programs", *Springer*, 1992.
- [14] Cepel, "Programa Anatem – Análise de Transitórios Eletromecânicos" – Manual do Usuário, 2010.