

# 1 Introdução

## 1.1. Descrição do Problema

Stable operation of a power system depends on the ability to continuously match the electrical output of generation units to the electrical load on the system. Consequently, load characteristics have an important influence on system stability

Prabha Kundur

Especialistas responsáveis pela operação dos sistemas elétricos de potência fundamentam suas decisões com base em diferentes simulações estáticas e dinâmicas de perturbações nas condições normais de operação, sempre com o intuito de otimizar a geração, minimizar perdas e maximizar a capacidade de transmissão de energia. Estes objetivos devem ser alcançados mantendo-se padrões de desempenho preestabelecidos e respeitando-se as margens de estabilidade do sistema elétrico de potência.

Estudos da estabilidade eletromecânica de sistemas elétricos de potência analisam o comportamento dos sistemas após distúrbios que ocorrem na rede elétrica. Esses distúrbios causam repentinas mudanças na configuração da rede elétrica, onde o sistema sai do ponto de operação estável pré-distúrbio. Dependendo da severidade ou do local de origem da ocorrência, deseja-se saber se o sistema pode atingir outro ponto de equilíbrio ou se ficará instável após a eliminação do distúrbio pelo sistema de proteção.

Durante contingências, geradores são submetidos a acelerações e desacelerações transitórias e certas unidades ou grupos de unidades geradoras podem perder sincronismo entre elas ou em relação ao sistema. Dependendo da natureza e da duração do distúrbio, o comportamento eletromecânico das unidades geradoras pode ser amortecido ou não, determinando assim um novo ponto de operação estável ou o colapso do sistema.

Ao longo do tempo, foram desenvolvidos modelos matemáticos cada vez mais precisos para simulações computacionais de geradores, linhas de transmissão, transformadores e demais elementos que constituem e influenciam o comportamento dos sistemas elétricos.

No entanto a modelagem das cargas elétricas para simulações dinâmicas e estáticas do sistema continua sendo um desafio, em face às suas variações ao longo do tempo e à complexidade que envolve agregar milhares de componentes que consomem energia da rede em uma representação precisa. É amplamente conhecido o problema de se obter modelos de cargas representativos da realidade, devido à sua aleatoriedade, sua característica sazonal e à demanda por energia em constante expansão, particularmente acelerada nos últimos anos, consequência de um país que cresce de forma sustentada.

A modelagem de carga tem grande impacto em simulações dinâmicas do sistema, especialmente estudos de estabilidade, onde a dinâmica de reaceleração de motores industriais influencia o restabelecimento do sincronismo entre as unidades geradoras hidráulicas.

Modelos de cargas muito otimistas podem comprometer a segurança do sistema, calculando margens de estabilidade maiores do que as condições operativas reais impõem; enquanto resultados de simulações muito pessimistas, reduzem a capacidade de transferência de potência em linhas de transmissão.

A resposta das cargas a desvios de tensão e frequência de seus valores operacionais é um dos fatores que influenciam a perda ou não de estabilidade do sistema. Modelos capazes de reproduzir com fidelidade o comportamento de cargas durante e após distúrbios aumentam a confiabilidade dos resultados de simulações, possibilitando aos operadores antecipar condições emergenciais em potencial ou maximizar a transmissão de energia de linhas de transmissão específicas.

## **1.2. Motivação do Trabalho**

A modelagem de carga baseada em medições do sistema de potência (*measurement-based load modeling*) é o estado da arte na representação da variação da potência consumida nos barramentos de carga em função de

perturbações, através de um modelo matemático cujos parâmetros são obtidos com técnicas de estimação, baseados em dados medidos para o “treinamento” do modelo. Esta filosofia de modelagem veio substituir a modelagem baseada em componentes (*component-based load modeling*), que assumia a representação de cargas como uma agregação de diferentes modelos com significado físico (modelos “caixa branca”), algo extremamente difícil de precisar em sistemas de grande porte, que suprem a carga de milhares de equipamentos com as mais diversas características. No passado, para validar modelos de carga baseados em componentes eram necessários ensaios em campo, com condições específicas e complicadas de serem realizadas na prática. O advento de sistemas de monitoramento mais modernos e redes de comunicação mais confiáveis, além da facilidade de armazenamento e processamento de dados dos dias de hoje adotou a filosofia da modelagem de carga baseada em medições.

Os dados utilizados nessa dissertação de mestrado foram extraídos de um banco de dados da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), que detém um sistema de medição de qualidade de energia responsável por gravar registros de tensões e correntes medidas antes, durante e depois de distúrbios ocorridos no seu sistema e nos sistemas de distribuição de outras concessionárias. É preciso extrair informações úteis da enorme massa de dados, lançando mão de técnicas de processamento de sinais, e métodos matemáticos que possam transformar dados brutos em conhecimento para os especialistas do setor elétrico.

A CHESF atua na geração, transmissão e subtransmissão de energia elétrica de todo o nordeste brasileiro, com um parque gerador de 14 hidrelétricas (cerca de 10 % da capacidade instalada no Brasil), mais de 18.000 km de linhas de transmissão e dezenas de modernos medidores de qualidade de energia instalados em diversas subestações de sua área de atuação.

É essencial para área de operação da CHESF a realização de estudos dinâmicos, a fim de conhecer com segurança os limites de transferência de energia entre as áreas de intercâmbios e entre seus subsistemas, além de reproduzir, nas análises de ocorrências, o comportamento dinâmico do sistema diante de grandes perturbações.

O ANATEM é a ferramenta computacional de simulação de transitórios eletromecânicos no domínio do tempo adotado por grande parte do setor elétrico brasileiro, incluindo a CHESF. Este *software* é utilizado para realizar estudos de

estabilidade tanto no âmbito da operação, quanto no planejamento de sistemas elétricos de potência. O ANATEM é desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) do Grupo Eletrobras, que trabalha em parceria com a CHESF num projeto institucional de pesquisa e desenvolvimento cujo foco é a obtenção de modelos de cargas a partir de medições de qualidade de energia.

O Operador Nacional do Sistema brasileiro (ONS) é a associação civil de direito privado, sem fins lucrativos, autorizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a executar as atividades de coordenação e controle da operação da geração e da transmissão de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN). Dentre as atividades que lhe competem, o ONS estabelece as diretrizes e os critérios de estudos elétricos no SIN em uma série de documentos disponíveis na sua página da internet: os “Procedimentos de Rede” [1], onde são descritos os modelos computacionais de simulações estáticas (fluxo de potência) e dinâmicas (estabilidade eletromecânica) do sistema, que calculam os impactos na frequência e nas magnitudes das tensões elétricas dos barramentos do sistema, causados por distúrbios típicos, como curtos-circuitos, descargas atmosféricas, entrada e saída de geradores, linhas e transformadores.

O ONS disponibiliza em sua página da internet arquivos no formato ANATEM que contêm modelos matemáticos para geradores, transformadores, linhas de transmissão, e detalhes dos mais diversos elementos que compõem o sistema, como reguladores de tensão e velocidade dos geradores, elementos de compensação de potência reativa e, entre muitos outros, os modelos de carga.

Entretanto, os modelos de carga atualmente disponibilizados nos arquivos do ANATEM são baseados em critérios muito antigos e presumidamente não refletem o comportamento atual das cargas. O resultado dessa imprecisão na modelagem da carga pode levar os resultados das simulações a mascarar informações preciosas, como a capacidade total de transmissão de energia em linhas de transmissão.

Uma vez que os modelos de cargas, disponibilizados no “caso base” (arquivo que representa o sistema elétrico de potência do SIN) do ANATEM, indicados como referência pelo ONS no sub-módulo 23.3 de [1], representa simplificada o comportamento dinâmico das cargas, a CHESF junto ao CEPEL vêm pesquisando técnicas de obtenção sistemática de modelos compatíveis com o comportamento real de cargas supridas pela rede básica, a

partir de registros de distúrbios estudados em simulações que investigam a estabilidade eletromecânica de seu sistema.

### 1.3. Objetivos do Trabalho

Os objetivos do trabalho são resumidos nos seguintes tópicos:

- Apresentar o resultado de uma pesquisa bibliográfica e estudo dos modelos de carga propostos pela literatura especializada e utilizados nos últimos 20 anos em estudos da rede elétrica.
- Apresentar uma Metodologia para obtenção de modelos de carga, baseados em medições de qualidade de energia, para simulações dinâmicas.
- Estimar os parâmetros de modelos de carga dinâmicos  $f$  e  $g$  para representar a potência ativa ( $P$ ) e reativa ( $Q$ ), consumida por barramentos de carga, em função de variações da tensão elétrica ( $V$ ), com uma heurística baseada em Algoritmos Genéticos (AG), tal que sejam determinadas relações matemáticas do tipo  $P(t)=f(V,t)$  e  $Q(t)=g(V,t)$  com base em medições de  $P(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $V(t)$ .
- Apresentar resultados práticos, comparando:
  - Curvas de potência  $P_{med}(t)$  e  $Q_{med}(t)$  medidas em subestações selecionadas, em função de afundamentos de tensão medidos.
  - Curvas de potência  $P_{calc}(t)$  e  $Q_{calc}(t)$  calculadas com os modelos propostos pela metodologia respondendo aos mesmos afundamentos de tensão medidos.
  - Curvas de potência  $P_{ZIP}(t)$  e  $Q_{ZIP}(t)$  com os modelos disponibilizados pelo ONS no caso-base do ANATEM, respondendo aos mesmos afundamentos de tensão medidos.
- Apresentar os resultados de uma simulação no ANATEM para um distúrbio no sistema de 230kV da CHESF, com barramentos de cargas de 69kV de sua área leste representadas pelos modelos obtidos com a metodologia, e compará-los com uma simulação idêntica utilizando os modelos originalmente presentes nos arquivos publicados pelo ONS.

#### **1.4. Organização do Trabalho**

- O capítulo 2 apresenta uma revisão de modelos de carga propostos na literatura científica, descrevendo as diversas classificações existentes.
- O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada para modelagem de carga baseada em dados reais de medição, incluindo detalhes do processamento dos dados, da definição da estrutura do modelo matemático proposto e da estimação de parâmetros com AG.
- O capítulo 4 mostra um estudo de caso real, discutindo critérios de seleção de dados e separação dos mesmos, além da obtenção e validação dos modelos.
- O capítulo 5 apresenta resultados da simulação no ANATEM comparando o impacto da representação mais precisa das cargas em simulações dinâmicas.
- O capítulo 6 traz as conclusões e aponta os possíveis caminhos para desenvolvimentos futuros.
- O Apêndice I descreve conceitos de identificação de sistemas, nome genérico dado ao conjunto de métodos que modelam sistemas dinâmicos baseados em dados observados, que serve de arcabouço teórico e lista as linhas gerais do procedimento para a modelagem de carga baseada em medições.
- O Apêndice II descreve os conceitos básicos da técnica de estimação de parâmetros adotada neste trabalho, o AG.
- O Apêndice III apresenta os resultados de estudos de casos em várias subestações da CHESF.