

# 1 Introdução

## 1.1. Considerações Gerais

Um sistema elétrico de potência tem como funções gerar, transmitir e entregar aos consumidores energia elétrica de forma confiável, segura e econômica. Devido ao crescimento da população, o contínuo desenvolvimento econômico e os avanços tecnológicos, a demanda de energia tem aumentado, e juntando esses fatores com os baixos investimentos, restrições técnicas, ambientais, econômicas e a complexidade da topologia, a operação e planejamento dos sistemas de potência dentro dos pilares de segurança e confiabilidade têm se tornado um grande desafio.

Nesse contexto, o desenvolvimento de ferramentas computacionais que capturem mais fielmente o comportamento e composição dos sistemas elétricos de potência, e que possam contribuir significativamente para facilitar sua avaliação, é um tema de pesquisa de grande relevância para os sistemas atuais.

A análise do fluxo de potência é a ferramenta mais frequentemente utilizada nos estudos envolvendo sistemas elétricos de potência. Consiste, basicamente, no cálculo das tensões nodais, em módulo e ângulo, e dos fluxos de potência em sistemas de transmissão, para uma condição de carga e geração especificada, assim como os parâmetros e topologia da rede [1] [2]. A solução do fluxo de potência corresponde a uma “fotografia” do sistema em um certo instante de tempo. Este tipo de estudo é utilizado no planejamento da expansão dos sistemas elétricos avaliando os distintos cenários ante uma demanda estimada, na operação diária dos sistemas, como uma sub-rotina de aplicações mais complexas como estabilidade transitória, otimização, estabilidade de tensão e análise de contingências [3], assim como verificar a proximidade das condições-limite durante a operação, dentre outras.

O método de Newton-Raphson para solução de equações algébricas não lineares é um método clássico de reconhecida eficiência no cálculo numérico. Sua aplicação na solução do problema do fluxo de potência tornou-se amplamente aceita, com a introdução dos métodos de solução de sistemas de equações lineares com matrizes de coeficientes esparsas por fatoração triangularmente ordenada [4].

A necessidade de desenvolvimento de ferramentas que melhorem as condições de análise acompanha o crescente aumento da complexidade dos sistemas elétricos de potência. Para isto, é necessário desenvolver modelos que representem os elementos do sistema da maneira mais adequada possível.

Na formulação básica do fluxo de potência, qualquer desbalanço entre a carga, perdas elétricas e geração é absorvido pela barra de referência angular (também conhecida como *swing* ou *slack*), mas como um gerador *swing* não existe na prática, e é apenas uma entidade matemática, ante qualquer evento, todos os geradores assumem parte dessas variações. Assim, em [5] é apresentado uma modelagem para o tratamento de múltiplas barras *swing* no sistema que busca representá-los com mais exatidão para a análise do fluxo de potência. Por outro lado, o fato de considerar a frequência do sistema mantida no seu valor nominal, em alguns casos pode tornar estudos específicos incompletos ou até imprecisos. Assim em [6] é proposta uma modelagem para a representação da regulação primária de geradores no problema de fluxo de potência, com a inclusão das equações que modelam seu comportamento; e em [7] é proposta uma modelagem que considera a variação dos parâmetros da rede com a frequência, de modo que qualquer tipo de alteração na frequência dos geradores afeta os parâmetros.

Com a operação do sistema perto dos seus limites, a segurança de tensão vem se tornando um assunto de grande preocupação nas empresas de energia elétrica do mundo inteiro, sendo apontada como uma das maiores fontes de insegurança dos sistemas de energia. A estabilidade de tensão refere-se à capacidade do sistema de potência em manter as tensões estáveis em todas as barras do sistema quando é submetido a uma perturbação [8].

Com a finalidade de manter o fornecimento de energia elétrica, uma das soluções tradicionais foi inserir capacitores na rede de transmissão, tendo como resultado a possibilidade de transferir maior potência em níveis de tensão adequados. No entanto, o uso acentuado destas fontes de potência reativa deu origem ao problema de estabilidade de tensão. Alguns exemplos são descritos em [9].

O fenômeno de estabilidade de tensão está intrinsecamente ligado ao fluxo de potência ativa e reativa sobre a rede, ao comportamento das cargas face às variações de tensão, à ação de dispositivos automáticos de controle de tensão e limitação de sobre-excitação de geradores, entre outros.

Neste cenário, os esforços dos pesquisadores são divididos em duas áreas: (i) a compreensão do fenômeno, (ii) novos métodos capazes de avaliar as condições de carregamento da rede. Estas duas áreas são complementares, já que, com a compreensão do fenômeno, é possível desenvolver métodos mais eficientes para melhorar o desempenho dos sistemas e manter a estabilidade de tensão.

Na literatura, existem diversas técnicas para análise de estabilidade de tensão [10] [11]. Na maioria destas, são encontradas margens de estabilidade de tensão, as quais permitem medir a distância entre o ponto de operação e o ponto correspondente ao máximo carregamento (“ponta do nariz”) na curva  $\phi$  constante no plano SV.

Uma técnica utilizada é o método da matriz  $[D']$ , que possui a capacidade de identificar a região de operação, estimar o ponto de máximo carregamento em redes complexas, identificando áreas susceptíveis a problemas de instabilidade de tensão. A análise realizada por este método é nodal e, deste modo, a localização de área da rede muito carregada é imediata.

Entre os índices de avaliação das condições de estabilidade destacam-se a  $S_m$  [p.u.], que é uma estimativa da máxima potência que poderia ser injetada, a ser comparada com a potência injetada  $S_i$  [p.u.], e o ângulo  $\beta$  entre os vetores gradiente dos fluxos de potência ativa e reativa no plano do módulo e ângulo da

tensão na barra em análise. Estes índices indicam a região de operação na curva  $\phi$  constante e a margem de potência para a máxima carga, além de outras informações.

## 1.2. Objetivos

Os objetivos gerais deste trabalho podem ser divididos em duas partes principais: (i) verificar a aplicabilidade das modificações na modelagem clássica no problema do fluxo de potência e (ii) verificar a aplicabilidade de tais modelagens na avaliação das condições de estabilidade de tensão.

Os objetivos específicos podem ser definidos como:

- i) Verificar a adequação da utilização da modelagem com representação de múltiplas barras *swing* no problema do fluxo de potência em um sistema com duas e três barras *swing*, e calcular os índices de estabilidade de tensão considerando que as variações infinitesimais de carga são assumidas pelos geradores proporcionalmente às suas potências geradas no caso-base e proporcional às suas energias de regulação, antes de algum evento;
- ii) Verificar a adequação da utilização da modelagem com múltiplas barras *swing* no problema do fluxo de potência e na avaliação das condições de estabilidade de tensão após um evento de variação de carga;
- iii) Verificar a adequação da utilização da modelagem com representação da regulação primária no problema do fluxo de potência e na avaliação das condições de estabilidade de tensão após um evento de variação de carga;
- iv) Verificar a adequação da utilização da modelagem com representação de parâmetros da rede variáveis com a frequência no problema do fluxo de potência e na avaliação das condições de estabilidade de tensão após um evento de variação de carga.

### 1.3. Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão dos conceitos associados à operação e controle de sistemas de potência, incluindo os fundamentos da regulação própria, primária e secundária. São caracterizados os fundamentos que demonstram o surgimento do fenômeno da estabilidade de tensão na operação dos sistemas elétricos, a existência de uma máxima potência que pode ser transferida de um gerador a uma carga e uma ferramenta para avaliação das condições de segurança de tensão, utilizada para o cálculo dos índices de estabilidade de tensão.

No Capítulo 3 são descritas as modelagens utilizadas no cálculo do fluxo de potência, que são o método convencional, o tratamento de múltiplas barras *swing*, o modelo com a representação da regulação primária e o modelo com parâmetros da rede variáveis com a frequência. Ao final do capítulo é apresentado o modelo linearizado do sistema do sistema-teste para cada caso.

No Capítulo 4 é apresentada a ferramenta para avaliação das condições de segurança de tensão utilizada para o cálculo dos índices de estabilidade de tensão. São descritas as variações no sistema linearizado para o cálculo dos índices de estabilidade de tensão e o tratamento para cada tipo de barra. Ao final do capítulo é apresentado o sistema já estruturado para realizar a avaliação das condições de estabilidade do sistema-teste para cada modelagem.

No Capítulo 5 estão os resultados dos testes realizados com os programas desenvolvidos no ambiente *MatLab*®, correspondentes à determinação do ponto de operação e avaliação das condições de estabilidade de tensão, considerando a atuação da regulação primária, a presença de múltiplas barras *swing*, e parâmetros da rede variáveis com a frequência.

Finalmente, no Capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões do trabalho, bem como propostas de trabalhos futuros, com a intenção de continuar os trabalhos iniciados na presente dissertação.