

Determinação de Áreas de Segurança no Sistema Interligado Nacional do Paraguai a partir de Curvas PQV

J.P.A. NESPOLO*, D. MARUJO *, J.A. SANTOS, J.R.PESENETE**

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Medianeira

(e-mail: joaonespolo@alunos.utfpr.edu.br, diogomarujo@utfpr.edu.br)

**ITAIPU Binacional (e-mail: jandrade@itaipu.gov.br, pesente@itaipu.gov.br)

Abstract: Voltage stability assessment plays a significant role in the determination of the safety conditions of operating power system. In this context, the PQV curve is a powerful tool, since it expresses several useful information to voltage stability analysis in one three-dimensional diagram. In this sense, this paper proposes a methodology based on the application of the continuation power flow through a scheme of sequential simulations, which makes this task feasible for one or more buses of a realistic multi-bus power systems. The developed methodology was applied to the portion of Paraguay's National Interconnected System connected to Itaipu's 50 Hz sector, allowing it to obtain a security operation area using the PQV curve for a critical bus concerning voltage stability. A set of qualitative analysis of the voltage stability of the system under study is performed.

Resumo: A avaliação da estabilidade de tensão desempenha um papel fundamental no monitoramento da estabilidade de sistemas elétricos de potência e, por esse motivo, tem se tornado uma grande preocupação para as empresas do setor. Os métodos tradicionais, baseados nas curvas PV e QV, apesar de amplamente utilizados, apresentam limitações que podem comprometer sua confiabilidade e precisão. Por outro lado, a curva PQV se mostra uma ferramenta poderosa para essa finalidade, visto que apresenta, em um diagrama tridimensional, todas as informações relevantes para a análise da estabilidade de tensão. Este artigo propõe uma metodologia baseada na aplicação do método do fluxo de potência continuado por meio de um esquema de simulações sequenciais, que viabiliza a construção desse tipo de curva para uma ou várias barras de sistemas realistas de múltiplos barramentos. A metodologia desenvolvida foi aplicada à porção do Sistema Interligado Nacional do Paraguai (SIN-PY) conectada ao setor 50 Hz da usina hidrelétrica de Itaipu, permitindo o levantamento de uma área operação segura a partir da curva PQV para um barramento considerado crítico com relação à estabilidade de tensão. A partir da curva obtida, foi desenvolvida uma série de análises qualitativas acerca da estabilidade de tensão do sistema sob estudo.

Keywords: Electric power systems, Voltage stability; Continuation power flow; PQV curves; Sequential simulation.

Palavras-chaves: Sistemas elétricos de potência; Estabilidade de Tensão; Fluxo de potência continuado; Curvas PQV; Simulação sequencial

1. INTRODUÇÃO

O constante crescimento da demanda de energia elétrica, aliado a restrições de custo econômico e ambiental, têm contribuído para que os sistemas elétricos de potência modernos operem em condições próximas de seus limites de carregamento (SANTOS et. al., 2019).

Nesse novo contexto, o problema da instabilidade de tensão em redes de transmissão vem ganhando grande destaque no cenário internacional em função da ocorrência de diversos blecautes em numerosos países do associados a esse fenômeno. Diante disso, a definição de índices que permitam avaliar o grau de segurança desses sistemas com relação à instabilidade de tensão tem despertado interesse de

engenheiros e pesquisadores da área (SOSA-RIOS et. al, 2019).

As abordagens estáticas são amplamente difundidas para este fim, sendo as metodologias mais utilizadas baseadas no levantamento das chamadas curvas PV (TAYLOR, 1994). Uma curva PV é traçada para um fator de potência constante e expressa a variação de tensão de determinado barramento do sistema frente ao aumento da demanda. A Margem de Estabilidade de Tensão (MET) é a principal informação obtida através dessa curva, permitindo identificar a máxima carga que a rede é capaz de suprir de forma estável (MARUJO et. al., 2015). Contudo, é comprovado que o colapso de tensão ocorre quando a demanda de potência ativa e/ou reativa cresce além de determinado valor crítico, portanto, a definição exata dos limites do sistema para ambas as parcelas de potência é

essencial na análise da estabilidade de tensão. Isso requer que tais limites sejam definidos sobre o plano (P, Q) , sem nenhuma restrição sobre o valor do fator de potência da carga (CHIN-YIN LEE, 2010).

No trabalho de Haque (2002), é apresentado um método para definição de limites de transmissão baseado na curva PQ . A partir do modelo de um sistema simples de duas barras, os pontos de máxima transferência de potência são obtidos analiticamente e, posteriormente, os valores críticos de P e Q são mapeados sobre o plano (P, Q) , delimitando, assim, uma área de operação estável. Ching-Yin Lee (2010) estende esse método para sistemas de múltiplas barras e propõe uma metodologia baseada na curva PQV . Além dos valores críticos de potência ativa/reactiva, essa curva também leva em consideração os limites de tensão, condensando em um diagrama tridimensional todas as informações relevantes para a avaliação da estabilidade de tensão

O ANAREDE (CEPEL, 2019), programa utilizado por engenheiros e pesquisadores do setor elétrico brasileiro, permite a obtenção direta de curvas PV por intermédio do método da continuação. Este método (designado, no âmbito deste trabalho, como método do fluxo de potência continuado) aplica sucessivos incrementos de carga nas barras ou áreas do sistema previamente especificadas, resolvendo, para cada patamar de carregamento, o problema de fluxo de potência (CUTSEM; VOURNAS, 1998). As curvas PV são construídas automaticamente para os barramentos monitorados ao longo da execução. O programa também permite obter a curva QV , que, assim como a curva PV , também depende do fator de potência (MARUJO et al., 2015). Em contrapartida, não estão disponíveis no ANAREDE aplicações destinadas à construção de curvas PQV . A indisponibilidade de recursos com essa finalidade representa a principal restrição para utilização dessa ferramenta em estudos de estabilidade de tensão, logo, o desenvolvimento de metodologias com o intuito de viabilizar essa tarefa tem se mostrado bastante interessante. Aproveitando-se do fato de que uma curva PQV pode ser construída por meio da sobreposição de um número suficientemente grande de curvas do tipo PV , traçadas para os diferentes fatores de potência que a carga pode assumir, mostra-se praticável a utilização das ferramentas já disponíveis como base para o cumprimento desse objetivo.

Nesse sentido, este artigo propõe uma metodologia para construção de superfícies $V(P, Q)$ para sistemas multibarras baseada na realização de simulações sequenciais. O método do fluxo de potência continuado é aplicado considerando diferentes direções de crescimento de carga (diferentes fatores de potência da carga no caso base) e o estado do sistema é monitorado ao longo da execução para aquisição dos dados de potência ativa/reactiva e tensão. Os pontos de equilíbrio associados a cada caso de fluxo de potência convergido são mapeados no espaço tridimensional e, a partir disso, são geradas as curvas (P, Q, V) almeçadas.

O trabalho está dividido da seguinte maneira: na seção 2 é feita uma breve revisão bibliográfica a respeito das curvas PQV e sua utilização na avaliação da estabilidade de tensão de sistemas elétricos. Na seção 3 é apresentada a metodologia

proposta para a construção de curvas PQV para sistemas com múltiplas barras. Na seção 4, a mesma é aplicada ao Sistema Interligado Nacional do Paraguai, para o levantamento da curva PQV para um barramento considerado crítico. Por fim, a seção 5 apresenta as conclusões obtidas.

2. MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA E CURVAS PQV

O sistema elétrico de potência de duas barras ilustrado na Fig. 1 consiste em uma carga de impedância $\bar{Z}_C = R_C + jX_C$ alimentada por um barramento infinito, representado por uma fonte com tensão constante $\bar{E} = E\angle 0^\circ$, através de uma linha de transmissão com impedância $\bar{Z} = R + jX$.

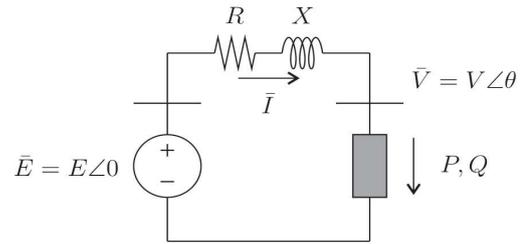


Fig. 1 Sistema de potência de duas barras.

Sendo $\bar{V} = V\angle\theta$ a tensão no terminal receptor e P e Q as potências ativa e reativa, respectivamente, consumidas pela carga, define-se as equações de fluxo de potência para um sistema sem perdas ($R \rightarrow 0$) como:

$$P = -\frac{EV}{X} \sin\theta \quad (1)$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos\theta \quad (2)$$

A eliminação de θ nas equações (1) e (2) resulta em:

$$(V^2)^2 + (2QX - E^2)V^2 + X^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (3)$$

Já que equação (3) é de segundo grau com respeito a V^2 , a condição necessária para a existência de ao menos uma solução é:

$$-P^2 - \frac{E^2}{X}Q + \left(\frac{E^2}{2X}\right)^2 \geq 0 \quad (4)$$

Uma vez que a condição (4) seja satisfeita, as duas soluções de (3) são expressas por::

$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX} \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - (XP)^2 - XQE^2} \quad (5)$$

A equação (5) define uma superfície tridimensional no espaço (P, Q, V) , ilustrada na Fig. 2 (CUTSEM; VOURNAS, 1998).

A curva horizontal destacada corresponde ao lugar geométrico dos pontos de máxima transferência de potência para todos os fatores de potência da carga na faixa apresentada. Nesses pontos, as duas soluções de (3) são reais e iguais (condição de

igualdade da equação (4)). Essa curva estabelece uma divisão da superfície em duas regiões distintas: a região superior, correspondente às soluções de alta tensão e baixa corrente e a região inferior, correspondente às soluções de baixa tensão e alta corrente. Sua projeção sobre o plano (P, Q) coincide com a parábola definida pela equação (4), que delimita o domínio de existência das soluções das equações de fluxo de potência e, portanto, permite delinear uma região de operação estável em termos das parcelas ativa e reativa da potência drenada pela carga. As curvas verticais, por sua vez, correspondem à intersecção da superfície (P, Q, V) com planos de potência reativa constante, cuja projeção sobre o plano (P, V) coincide com as curvas PV .

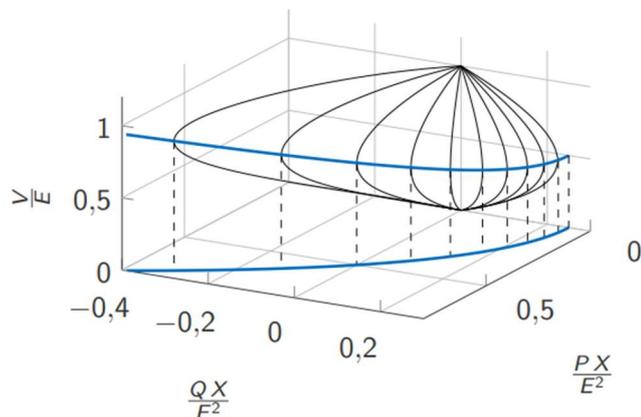


Fig. 2 Curva PQV típica.

Fonte: Adaptada em (CUTSEM; VOURNAS, 1998)

Uma curva PV , sendo traçada para um fator de potência constante, não fornece informações sobre a potência reativa da carga. Dessa forma, o estado da rede elétrica não é determinado de forma completa, o que pode levar à definição de margens de estabilidade de tensão excessivamente otimistas ou conservadoras, não condizentes com a real condição operativa do sistema. Por outro lado, as curvas PQ apresentadas anteriormente, apesar de não expressarem o comportamento das tensões do sistema, definem uma área de operação estável em função das potências ativa e reativa da carga que permite identificar limites operativos sem perda de informação e, portanto, podem ser utilizadas na monitoração da estabilidade de tensão.

Com isso, fica evidente que as curvas PV e PQ , quando utilizadas isoladamente, definem a condição operativa do sistema elétrico de maneira parcial e que uma descrição completa para a avaliação da estabilidade de tensão (estática) exige o conhecimento do trinômio (P, Q, V) . Nesse sentido, a aplicação de curvas PQV em estudos de estabilidade de tensão pode ser realizada mediante análise de suas projeções sobre os planos (P, Q) e (P, V) , coincidentes com as curvas PQ e PV , respectivamente. A avaliação de ambas as projeções de forma complementar caracteriza detalhadamente o sistema e permite a definição de limites de transmissão independentes do fator de potência (por meio da curva PQ), bem como o acompanhamento do comportamento da tensão do barramento monitorado frente ao aumento da demanda (através das curvas PV). Essas informações auxiliam os operadores na proposição

de ações de controle no sentido de manter um perfil de tensão satisfatório e de evitar que o sistema opere numa condição considerada crítica, promovendo uma drástica redução na probabilidade de ocorrência de colapsos de tensão e a garantia de uma operação melhor otimizada.

3. MÉTODO PARA CONSTRUÇÃO DE CURVAS DO TIPO PQV PARA SISTEMAS MULTIBARRAS

Para um sistema de duas barras, a determinação da curva PQV como uma superfície contínua é viável por meio de métodos analíticos, conforme o procedimento descrito na seção 2. No entanto, para sistemas realistas multibarras, a obtenção dos pontos de equilíbrio envolve a resolução de um sistema complexo de equações algébricas não-lineares.

A aplicação do método do fluxo de potência continuado é a abordagem mais utilizada atualmente para a identificação desse ponto crítico. O objetivo do método é encontrar uma continuidade de soluções das equações de fluxo de potência para uma dada condição de mudança de carga. Partindo de uma solução conhecida (caso base), é aplicado um esquema preditor-corretor que permite encontrar subseqüentes soluções até o ponto de colapso de tensão. A aplicação desse procedimento para uma dada direção de crescimento de carga possibilita a identificação do ponto de colapso de tensão para essa direção específica, bem como o levantamento das curvas PV para os barramentos cujos valores de potência ativa e tensão são monitorados ao longo do processo.

Quando o método é aplicado para várias direções de crescimento de carga distintas, é construída uma série de curvas PV , cada uma com um ponto de colapso de tensão associado. Conforme comentado na seção 2, cada curva PV é traçada para um fator de potência constante, logo, as diferentes direções de crescimento de carga são obtidas através do ajuste do valor do fator de potência da carga da barra/área em estudo. A curva PQV é obtida sobrepondo todas as curvas obtidas em um diagrama tridimensional. Além disso, uma vez calculados todos os pontos de colapso de tensão, uma curva limítrofe Γ é definida mapeando os mesmos sobre o plano (P, Q) . Essa curva coincide com a parábola comentada na Seção 2 e, portanto, delimita uma área de operação estável.

No presente artigo, propõe-se um método para construção de curvas PQV para sistemas multibarras baseada em um esquema de simulações sequenciais que permite executar o método do fluxo de potência continuado para várias direções de crescimento de carga, modificando automaticamente o carregamento da barra/área sob estudo a cada nova iteração. Através da monitoração das variáveis de interesse (potência ativa/reativa e tensão) ao longo do processo, são construídas as curvas PQV para os barramentos monitorados.

O método é definido segundo o fluxograma ilustrado na Fig. 3. O procedimento se desenvolve na seguinte seqüência: Passo 1 - especificação dos dados de entrada necessários, que correspondem a um caso convergido de fluxo de potência (caso base) e a faixa de fatores de potência para a qual será executado o método do fluxo de potência continuado. Passo 2 - ajuste do carregamento da barra/área avaliada. Passo 3 - aplicação do algoritmo de fluxo de potência continuado ao

sistema com a carga ajustada. Passo 4 – aquisição dos dados de potência ativa/reactiva e tensão gerados ao longo das simulações. Passo 5 – construção das curvas PQV para os barramentos monitorados durante o processo.

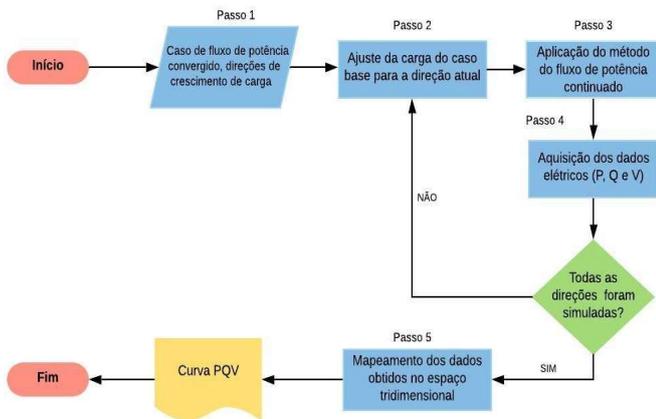


Fig. 3. Fluxograma da metodologia proposta.

4. APLICAÇÃO AO SISTEMA INTERLIGADO À ITAIPU 50 Hz

O Sistema Interligado Nacional do Paraguai, administrado pela *Administracion Nacional de Eletricidad* (ANDE), atualmente opera dividido em dois subsistemas eletricamente isolados. O subsistema 1 é abastecido majoritariamente pela central hidrelétrica de Itaipu e opera interligado ao sistema elétrico brasileiro através de um elo de corrente contínua de ± 600 KV entre as subestações de Foz do Iguaçu e Ibiúna. O subsistema 2 é alimentado pela central de Yacyretá e opera em paralelo com o SADI (Sistema Argentino de Interligação). A metodologia proposta neste trabalho foi aplicada ao sistema interligado ao setor de 50 Hz da usina hidrelétrica de Itaipu (subsistema 1), ilustrado esquematicamente na Fig. 4.

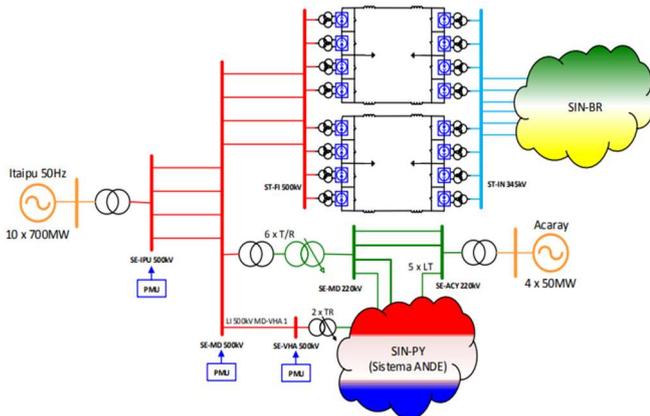


Fig. 4. Sistema interligado a Itaipu 50Hz.

Esse sistema apresenta grande susceptibilidade à instabilidade de tensão, especialmente em razão de sua topologia predominantemente radial e dos parâmetros da sua rede de transmissão (alta reatância indutiva dos circuitos). Por esse motivo, é fundamental a utilização de ferramentas que permitam a monitoração da estabilidade de tensão do mesmo, com o intuito de embasar os operadores na adoção de possíveis

medidas preventivas/corretivas que atuem no sentido de garantir uma operação com maior confiabilidade e segurança.

Nesse sentido, por meio da metodologia proposta, foi levantada uma curva PQV para a subestação de San Lorenzo, considerada uma barra crítica do sistema. Para tanto, considerou-se o sistema operando em condição de rede completa, sob carga leve (750 MW).

Para a aplicação do método da continuação ao sistema de potência em questão, foi utilizado o programa de fluxo de potência continuado disponível no ANAREDE (CEPEL, 2019). Este aplicativo corresponde ao programa computacional mais utilizado em território brasileiro para análise de sistemas elétricos de potência em regime permanente e, além disso, compõe a lista de ferramentas recomendadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS); através do submódulo 18.2 de seus Procedimentos de Rede; para o desenvolvimento de estudos elétricos (ONS, 2016).

É importante frisar que o desenvolvimento de estudos no âmbito da estabilidade de tensão depende da adoção de um conjunto de critérios. Foi definida a execução de aumentos de carga nas barras PQ de todas as áreas do sistema pertencentes à ANDE, com um incremento de 3% em relação ao carregamento do caso base, tanto para a parcela ativa quanto para a parcela reativa, o que assegurou a manutenção do fator de potência ao longo de cada execução do programa de fluxo de potência continuado. Ressalta-se que foram realizadas simulações com um incremento menor (0,05%), com o intuito de avaliar a influência desse parâmetro sobre os resultados. Constatou-se que as curvas permaneceram praticamente inalteradas, de forma que o incremento de 3% adotado apresentou um bom compromisso entre a exatidão requerida e o tempo de execução demandado.

Além disso, com o intuito de obter resultados mais realistas, foram consideradas cargas variáveis com a tensão. O modelo adotado foi o de impedância constante para 100% da carga (potência ativa e reativa). Por fim, a barra de 500 KV da SE-MD 500KV foi definida como a referência angular do sistema e fixada como a responsável pelo suprimento das variações de demanda ao longo da execução do algoritmo do fluxo de potência continuado, sendo seus limites de geração de potência reativa mantidos abertos.

O método desenvolvido foi aplicado ao sistema por intermédio de um algoritmo implementado em linguagem *Python*, que viabilizou o gerenciamento das simulações sequenciais realizadas no ANAREDE, bem como o monitoramento dos valores de potência ativa/reactiva e tensão através da leitura dos relatórios de execução emitidos pelo mesmo em um procedimento de co-simulação. Ao final do processo, os dados obtidos no decorrer das simulações foram mapeados no espaço tridimensional para construção das curvas (P, Q, V) .

Seguindo procedimento semelhante ao proposto no trabalho de Santos et. al (2019), no início de cada iteração, o carregamento do sistema é automaticamente modificado com o intuito de variar o fator de potência global (cada condição de carregamento corresponde a uma direção de crescimento de

carga). A potência reativa de todas as barras de carga do sistema é ajustada segundo a equação 6, resolvida para Q .

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (6)$$

É importante ressaltar que a carga ativa é mantida constante ao longo de todo o processo e a potência reativa é distribuída, a cada reajuste, entre todas as barras de carga das áreas avaliadas de forma proporcional ao carregamento do caso base. Esse procedimento é equivalente à conexão de um compensador *shunt* fictício cuja potência reativa de saída é controlada com o intuito de modificar convenientemente o fator de potência da carga. Os dados de entrada do programa são: um caso de fluxo de potência convergido (arquivo de extensão .SAV do ANAREDE contendo o modelo do sistema) e uma lista (tipo de dado da linguagem *Python*) contendo as direções de crescimento de carga que se pretende avaliar. Foram simuladas cinco direções de crescimento de carga distintas, especificadas da seguinte maneira:

FP = [0.9 indutivo, 0.95 indutivo, 1 unitário, 0.95 capacitivo, 0.9 capacitivo]

Transcorrido um total de, aproximadamente, 1500 simulações (uma média de 300 casos para cada direção de crescimento de carga), foi gerada como saída do programa a curva PQV para a Subestação de San Lorenzo, ilustrada na Fig. 5.

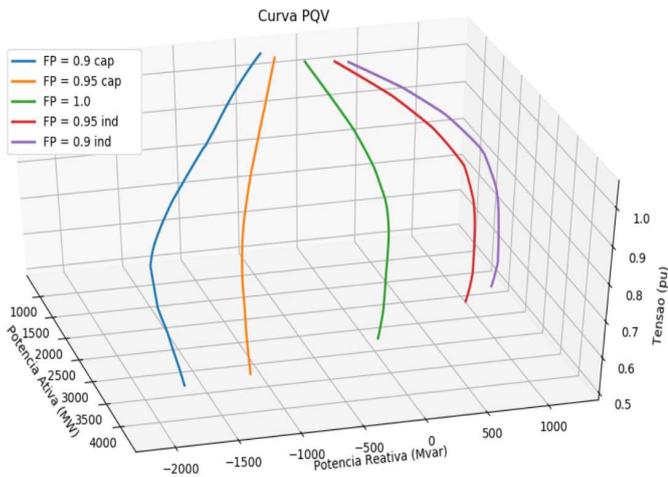


Fig. 5. Curva PQV para a Subestação de San Lorenzo.

Como o método desenvolvido permite avaliar apenas uma quantidade finita de direções de crescimento de carga, é evidente que a curva gerada se trata de uma aproximação discreta. No presente estudo, utilizou-se um passo de 0,05 MW/MVA para variação do fator de potência, no entanto, é fácil constatar que, adotando-se um passo suficientemente pequeno (tendendo a zero), é possível manter o erro associado dentro de uma tolerância previamente estabelecida. Destaca-se que o fator de potência foi mantido constante em todas as barras do sistema ao longo das simulações com o intuito de proporcionar uma melhor visualização da trajetória percorrida pelos estados do mesmo sobre a superfície PQV diante do incremento de carga. Caso esse incremento fosse realizado de

forma a impor diferentes condições de fator de potência aos barramentos do sistema, a única diferença observada seria a descrição de diferentes trajetórias ao longo da mesma superfície PQV . Isso ocorre pelo fato de a curva PQV se tratar de uma característica própria da rede de transmissão e independente das cargas alimentadas pela mesma, o que garante que na superfície obtida está contida a informação referente à todas as direções de crescimento de carga possíveis dentro da faixa avaliada e, por esse motivo, o procedimento adotado não implica perda de generalização. Para uma melhor visualização dos resultados, também foram levantadas as projeções da curva sobre os planos (P, V) e (P, Q) , ilustradas nas Fig. 6 e 7, respectivamente.

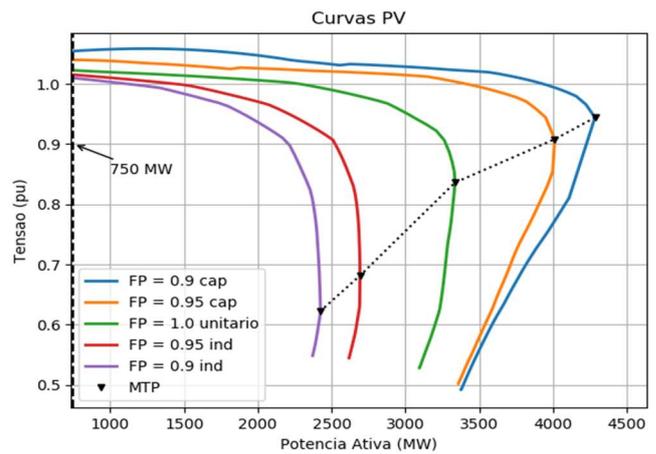


Fig. 6. Projeção da superfície $V(P, Q)$ sobre o plano (P, V) da Subestação de San Lorenzo.

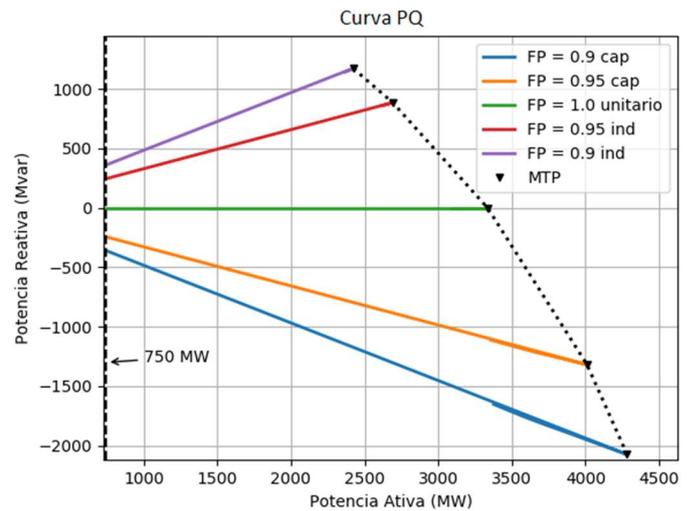


Fig. 7. Projeção da superfície $V(P, Q)$ sobre o plano (P, Q) da Subestação de San Lorenzo.

Os pontos marcados nas Fig. 6 e 7 são aqueles onde ocorre a máxima transferência de potência para cada direção de crescimento de carga avaliada, e a linha pontilhada representa a trajetória percorrida por este ponto diante da variação do valor do fator de potência. A linha tracejada vertical no canto

esquerdo das figuras corresponde à potência ativa dos casos base, mantida constante para todas as simulações.

Através da Fig. 6, é possível constatar que a capacidade de transferência de potência ativa do sistema aumenta com o crescimento da característica capacitiva da carga, o que evidencia as deficiências associadas à prática comum de propor margens de estabilidade de tensão com base em uma única curva *PV* traçada para um fator de potência específico. Considerando, por exemplo, que o sistema opera no ponto definido pelo par ordenado $(P, Q) = (2500 \text{ MW}, 821.7 \text{ Mvar})$ ($FP = 0.95$ indutivo), o mapeamento do mesmo sobre o plano (P, Q) ilustrado na Fig. 7 indica que o sistema se encontra em condições estáveis e, ainda, apresenta alguma folga operativa. Por outro lado, supondo que uma análise semelhante fosse realizada através de uma única curva *PV*, traçada para um fator de potência fixo estimado em $FP = 0.9$ indutivo (curva roxa na figura 6), o mesmo ponto já seria considerado instável; visto que o sistema seria incapaz de suprir uma potência ativa de 2500 MW à esse fator de potência; e, antes disso, os operadores do sistema já teriam colocado em prática ações de controle desnecessárias temendo a ocorrência de um colapso indicado por uma margem de estabilidade excessivamente conservadora. Nesse sentido, fica evidente a importância de levar em consideração as informações relativas à potência reativa no momento de definir limites de operação factíveis. Isso pode ser feito, por exemplo, através do levantamento de uma família de curvas *PV* para diferentes fatores de potência, contudo, a curva *PQ* expressa a mesma informação de forma muito mais clara e concisa, permitindo identificar diretamente os limites operativos que se pretende definir.

Como foi adotado o modelo de carga de impedância constante, o ponto de colapso de tensão ocorre na parte inferior da curva e, dessa forma, não coincide com o ponto de máxima transferência de potência (que ocorre no, comumente designado, “nariz” da curva). Na Fig. 8, é destacada a área de operação estável definida sobre o plano (P, Q) .

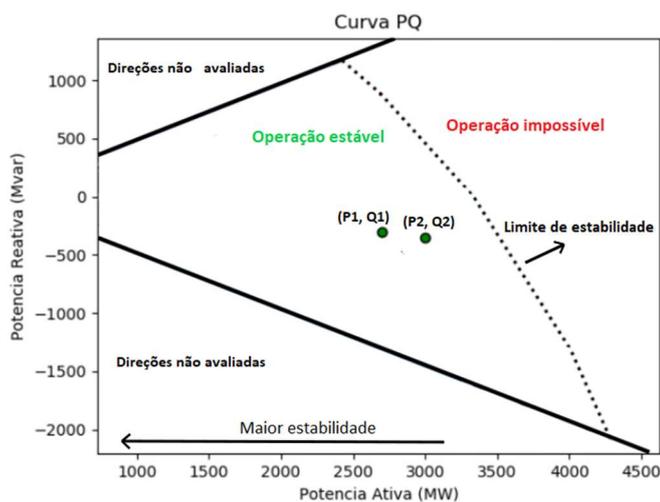


Fig. 8. Delimitação da região de operação estável.

Medindo os valores de potência ativa e reativa consumidas pela carga e mapeando-os sobre o plano (P, Q) , é possível

monitorar a estabilidade de tensão do sistema e identificar se determinada condição é segura ou não. De acordo com o diagrama da Fig. 8, os pontos operativos contidos na região delimitada pelas linhas lisas e pela curva pontilhada são considerados estáveis com respeito à estabilidade de tensão, enquanto aqueles situados na região externa são pontos operativos impossíveis, visto que não existe solução das equações de fluxo de carga nessa região. Os pontos localizados exatamente sobre a linha pontilhada (onde ocorre a máxima transferência de potência) ainda são considerados estáveis, embora sejam críticos, visto que uma pequena variação na demanda pode conduzir o sistema à instabilidade. As regiões acima da linha superior e abaixo da linha inferior correspondem a valores de fator de potência não avaliados.

Dessa maneira, pode-se afirmar que a estabilidade relativa do sistema é mais elevada para pontos mais distantes da curva limítrofe, o que representa uma maior folga operativa e, conseqüentemente, maior confiabilidade e segurança. Monitorando a operação do sistema dessa maneira, torna-se possível a adoção de ações de controle no sentido de reforçar a rede elétrica com o intuito de obter margens mais acentuadas, ou ainda, uma vez identificadas condições críticas, a implementação de medidas preventivas com o propósito de proteger o sistema contra um eventual colapso.

Como exemplo, é possível afirmar que os pontos $(P_1, Q_1) = (2700 \text{ MW}, -300 \text{ Mvar})$ e $(P_2, Q_2) = (3000 \text{ MW}, -350 \text{ Mvar})$ são ambos estáveis. Contudo, o primeiro é considerado mais estável que o segundo, visto que este está mais próximo do limite de estabilidade de tensão. Os resultados obtidos estão claramente em concordância com o apresentado na seção 2, o que valida a metodologia proposta e a torna uma poderosa aliada em estudos de estabilidade de tensão de sistemas elétricos de potência reais.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho propôs um metodologia para construção de curvas do tipo *PQV* para sistemas realistas multibarras baseada na realização de simulações sequenciais, através da qual o método do fluxo de potência continuado é aplicado para uma série de direções de crescimento de carga distintas, permitindo a identificação de um conjunto de pontos de colapso de tensão cuja projeção sobre o plano (P, Q) delimita uma região de operação estável.

A metodologia desenvolvida foi aplicada à parcela do Sistema Interligado Nacional do Paraguai conectada ao setor de 50 Hz da usina hidrelétrica de Itaipu, por intermédio de um algoritmo implementado em linguagem *Python* que viabilizou o gerenciamento da sequência de simulações conduzidas pelo aplicativo ANAREDE, bem como a aquisição dos dados elétricos necessários para o levantamento das curvas almeçadas. Após conduzidas aproximadamente 1500 simulações de fluxo de carga, foi construída a curva *PQV* para a subestação de San Lorenzo, considerada uma barra crítica do sistema, e realizada uma série de análises qualitativas com relação a estabilidade de tensão do sistema nas condições operativas avaliadas. Além da proposição de uma metodologia que permite avaliar a estabilidade de tensão de sistemas de

potência reais de forma abrangente e confiável, uma segunda contribuição do presente trabalho é a extensão de ferramentas existentes em *softwares* comerciais, experimentada sobre o ANAREDE, programa acreditado no sistema elétrico brasileiro. Os autores já estão trabalhando na continuidade deste trabalho, que tratará de uma análise quantitativa, por meio da utilização de dados reais medidos e da comparação com eventos monitorados pela Usina de Itaipu.

REFERÊNCIAS

- CEPEL Centro de Pesquisas em Energia Elétrica. Programa ANAREDE – Análise de Redes – Manual do Usuário V11.02.04. [S.1], 2019.
- Cutsem, T. van, Vournas, C.W. (1998). *Voltage Stability of Electric Power Systems*. Springer.
- Ching-Yin L. et. al. (2010) A new approach to the assessment of steady state voltage stability margins using P-Q-V curve. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, volume 32, 1091-1098.
- Haque M. H. (2002). Determination of steady-state voltage stability limit using P-Q curve. *IEEE Power Engineering Review*, volume (22), 71–72.
- Marujo, D. et. al. (2015). On Control Actions Effects by Using QV Curves. *IEEE Transactions on Power Systems*, volume (30), 1298-1305.
- ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico. Submódulo 18.2 – Relação dos sistemas e modelos computacionais. [S.1], 2016.
- Santos, J.A. et. al. (2019). Desenvolvimento de uma metodologia para a realização de simulações em lote de forma sequencial, automática e adaptativa, utilizando o MATLAB para o gerenciamento e integração dos aplicativos ANAREDE e ANATEM. *XVIII ERIAC*. Foz do Iguaçu, Brasil.
- Sosa-Rios, M.L. et. al. (2019). Utilização de dados de unidades de medição fasorial para identificação de instabilidade de tensão. *XVIII ERIAC*. Foz do Iguaçu, Brasil.
- Taylor, C.W. (1994). *Power System Voltage Stability*. McGraw-Hill, New York.