



**XXIII SNTPEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GOP/16  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - IX**

**GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS- GOP**

**AValiação de Segurança de Tensão Considerando uma Técnica Híbrida de Previsão de Carga**

**Diogo Marujo (\*)  
UNIFEI**

**M. V. Santos  
UNIFEI**

**A. C. Zambroni de Souza  
UNIFEI**

**B. I. L. Lopes  
UNIFEI**

**RESUMO**

A previsão de carga constitui-se numa rotina de grande relevância no planejamento e na operação dos sistemas de potência. Diversos fatores interferem no comportamento e modelagem da carga, tais como: condições meteorológicas e fatores diversos, como efeito dos dias atípicos. Assim, este artigo apresenta uma metodologia para análise da segurança operativa de sistemas elétricos de potência. A margem de carga é determinada através do método da continuação. O comportamento da carga é previsto utilizando uma técnica híbrida baseada em lógica fuzzy e redes neurais. Testes são realizados considerando um sistema real visando avaliar a aplicabilidade da metodologia proposta.

**PALAVRAS-CHAVE**

Segurança Operativa, Previsão de Carga, Redes Neurais, Lógica Fuzzy, Método da Continuação

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O planejamento adequado dos sistemas elétricos de potência (SEP) deve garantir uma operação segura e econômica, de modo a prever e atender as variações de carga. O acréscimo de demanda no sistema exige o aumento no fluxo de potência reativa nas linhas e, na ausência deste suporte de reativos, eleva-se o risco de colapso de tensão.

Diversos trabalhos na literatura propõem a utilização técnicas de inteligência artificial na análise de estabilidade de tensão. Uma abordagem baseada em redes neurais para ordenar as contingências mais sérias do ponto de vista de estabilidade de tensão é proposta em [1]. Em [2] os autores propõem uma estratégia de controle coordenado de tensão baseado em sistema especialista com a utilização de lógica fuzzy. Uma estratégia de controle secundário de tensão que busca maximizar a margem de carga utilizando lógica fuzzy é apresentada em [3].

De acordo com [4] e [5] vários tipos de análises dependem do comportamento das cargas elétricas para serem devidamente realizados. Podendo-se citar o despacho econômico, fluxo de potência e estabilidade transitória como os estudos mais comuns em geração, transmissão, expansão e compra e venda de energia como os tipos de planejamento que comumente utilizam-se da previsão de carga. Logo, reforçando a necessidade e importância de bons métodos de previsão de carga.

Segundo [6], para que seja possível realizar a previsão de pontos futuros de uma série baseado no comportamento passado da mesma, evidentemente, necessita-se de uma memória histórica de dados. Entretanto, o conjunto de dados históricos, por si só, não permite a previsão de valores futuros. Para isso, é imprescindível a utilização de algoritmos, técnicas ou métodos de previsão de séries temporais, que podem envolver cálculos simples ou procedimentos complexos.

Uma grande variedade de técnicas estatísticas tem sido empregada como ferramenta para a previsão de diversas séries temporais com bons resultados. Entre estas, pode-se dividi-las em métodos de séries temporais, onde a carga é modelada como função de valores passados e modelos causais, em que a carga é modelada como uma função de fatores exógenos tais como clima e variáveis sociais e econômicas. No âmbito dos métodos de séries temporais, têm-se os modelos autoregressivos, filtro de Kalman, entre outros. Já entre os métodos causais, pode-se citar o modelo de Box-Jenkins, ARMAX, etc.[7]. Estes modelos possuem a grande vantagem de serem facilmente desenvolvidos e aplicados computacionalmente. Entretanto, devido à natureza não linear de um sistema elétrico de potência, tais métodos não são apropriados para a modelagem de séries de demanda de carga, fornecendo resultados insatisfatórios na previsão da mesma.

Deste modo, com o intuito de empregar métodos não lineares em processos de previsão, tem-se frequentemente utilizado técnicas de inteligência artificial. A tecnologia das Redes Neurais Artificiais (RNA's) representa um desses métodos, estabelecendo-se, atualmente, como uma ferramenta muito promissora, visto que estas são capazes de lidar com a natureza não estacionária da carga e, portanto, fornecer previsões precisas pelo meio do aprendizado das relações funcionais entre as entradas e saídas do sistema através do processo de treinamento da rede [8].

A previsão de carga utilizando uma abordagem neuro-fuzzy tem se destacado nas últimas décadas. Em [9] considera-se a previsão em um cenário desregulamentado e sensível ao preço no qual o consumidor pode reagir a mudança do preço. As vantagens das técnicas de redes neurais e lógica fuzzy são combinadas em [10] para previsão de carga de curto prazo. A seleção apropriada das cargas é feita em uma metodologia que combina a análise de Pearson e lógica fuzzy, sendo ela considerada como uma entrada para a rede neural.

Em função do crescente aumento da demanda de carga e, mais recentemente, da inserção cada vez maior de fontes de energia renováveis – estas com características intermitentes – os sistemas elétricos de potência tendem a operar mais próximos de seus limites. Em termos de estabilidade de tensão, os sistemas atuais operam com margens de carga reduzidas, o que potencializa eventuais problemas de suporte de potência reativa e, portanto, pode desencadear um processo de instabilidade de tensão.

Neste cenário, uma ferramenta de avaliação da segurança tensão que seja capaz de antecipar eventuais problemas de tensão e suporte de potência reativa faz-se necessária de modo a assegurar uma operação segura. Com este intuito, este trabalho propõe uma metodologia para análise da segurança operativa de sistemas elétricos, observando-se a necessidade para implementação em tempo real.

A metodologia proposta é composta por dois módulos de análise. O primeiro é responsável pela análise da margem de carregamento da rede através da utilização do método da continuação. O segundo módulo destina-se a realização da previsão da demanda dos barramentos de carga. Este utiliza um previsor híbrido baseado nas técnicas de redes neurais e lógica fuzzy.

## 2.0 - SISTEMAS NEURO-FUZZY

A característica não-linear dos sistemas elétricos de potência exige a execução de grandes quantidades de análises para o entendimento e desenvolvimento de um sistema de controle qualquer. As características adaptativas e de identificação de padrões inerentes das técnicas de inteligência artificial favorecem e justificam a crescente utilização destas nas mais diversas aplicações em sistema elétricos de potência.

Os Sistemas Neuro-fuzzy, utilizados neste trabalho, incorporam as características adaptativas das Redes Neurais Artificiais e a capacidade de inferência presente nos Sistemas Fuzzy. As Redes Neurais Artificiais são desenvolvidas com o intuito de modelar o funcionamento dos neurônios biológicos nos seres vivos. Desta maneira, incorporam capacidades de aprendizado, memorização e adaptação [11]. Entretanto, o processo de inferência das RNAs utilizado no mapeamento entre as variáveis de entrada e saída não é claro, o que dificulta capturar a tendência dos valores previstos na saída [12].

Os Sistemas Fuzzy por sua vez possuem a grande característica de representação do conhecimento através de um conjunto de regras do tipo “Se-Então”. No entanto, este tipo de sistema não possui capacidade de adaptação e aprendizado. No caso específico de previsão de séries de carga, a quantidade de informação dificulta a criação do banco de regras fuzzy.

O desenvolvimento de sistemas híbridos como o Neuro-fuzzy surge com o objetivo de aliar as potencialidades de cada uma das técnicas de inteligência artificial citadas. Conforme citado em [12], a utilização dos sistemas Neuro-fuzzy em problemas de previsão de cargas correspondem a cerca de 50% das aplicações. Isto ocorre em função capacidade destes modelos em se adaptar de forma efetiva.

### 3.0 - MÉTODO DA CONTINUAÇÃO

O método da continuação consiste em uma ferramenta de análise estática de estabilidade de tensão que identifica o ponto de colapso de tensão e a margem de carga do sistema quando da variação de um parâmetro. No escopo deste trabalho, o incremento de carga/geração é escolhido como parâmetro de bifurcação e, a partir de um ponto de operação, traça-se a curva que PV, equivalente ao diagrama de bifurcação.

De modo geral, o método utiliza o esquema predictor-corretor para encontrar um caminho de soluções para o conjunto de equações do fluxo de potência. Matematicamente, o novo conjunto de equações do fluxo de potência é representado pela equação (1):

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (1)$$

onde  $\lambda$  é o parâmetro que leva o sistema de um ponto de equilíbrio para o outro, e  $x$  representa as variáveis de estado, ou seja, os módulos e ângulos das tensões nas barras.

A partir de um ponto de operação conhecido utiliza-se o vetor tangente como predictor para estimar uma próxima solução correspondente ao novo valor de carga/geração, de acordo com a equação (2) [13]:

$$VT = \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta\lambda} = J^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

sendo  $\theta$  e  $v$  as tensões e ângulos,  $P_0$  e  $Q_0$  as potências ativas e reativas iniciais e  $J$  a matriz jacobiana do sistema.

Em seguida, é executado o passo corretor. Para estabelecer-se um ponto que seja uma solução deste sistema é necessário corrigir o ponto previamente encontrado de modo a posicioná-lo sobre uma região de equilíbrio do sistema. Qualquer método de solução de equações não-lineares pode ser utilizado sendo, neste caso, utilizado o método convencional de Newton-Raphson.

### 4.0 - METODOLOGIA

A metodologia para avaliação da segurança operativa do sistema pode ser dividida em três etapas. São elas: previsão de carga, determinação da margem de carga de tensão e critério de avaliação da segurança operativa. A seguir são descritas e cada uma das etapas anteriormente citadas.

#### 4.1 Previsão de Carga

Neste trabalho utilizou-se um Sistema Neuro-fuzzy baseado no Sistema Adaptativo de Inferência Neuro-fuzzy (ANFIS – *Adaptive Neuro-fuzzy Inference System*) onde a rede neural é utilizada para treinar e adaptar as funções de pertinência do sistema fuzzy, além de memorizar o conhecimento através das regras difusas. O sistema Neuro-fuzzy é treinado a partir de séries históricas de carga, onde utilizam-se seis valores de carga passados com o intuito de prever a carga futura para um horizonte de previsão de 30 minutos à frente.

Nos testes empregados neste trabalho, após o treinamento e desenvolvimento do Sistema Neuro-fuzzy, o mesmo é alimentado com uma série de valores de carga não utilizados na etapa de treinamento, de forma a simular uma leitura de dados em tempo real. A saída da previsão de carga é utilizada em seguida na análise da operação do sistema elétrico de potência.

#### 4.2 Margem de Colapso de Tensão

Alguns indicadores podem apresentar o estado de um sistema elétrico de potência em relação a critérios econômicos ou de segurança. O custo operacional instantâneo das usinas geradoras e a perda total de potência ativa são indicadores de critérios econômicos. Para critérios de segurança, a margem de colapso de tensão pode ser utilizada para determinar o grau de segurança do caso base ou selecionar as piores contingências.

A margem de colapso de tensão estabelece a quantidade de carga que pode ser adicionada ao ponto de operação até o ponto de colapso, ou seja, é definida como a distância entre o carregamento no ponto inicial e o ponto de colapso. Para obtê-la, assim como para determinar o barramento crítico, são utilizadas as técnicas do vetor tangente e do método da continuação.

A barra crítica é determinada considerando a maior componente do vetor tangente da equação (2). Como vantagem, esta barra é identificada em um ponto no qual o sistema ainda não atingiu o ponto de bifurcação, possibilitando que o operador tome algumas medidas para evitar o colapso de tensão.

#### 4.3 Critério de Avaliação da Segurança Operativa

- A partir de dados históricos de carga do sistema, é realizada a previsão de carga para um determinado período com a utilização de técnicas de redes neurais. Caso sejam utilizados dados de carga de várias barras do sistema, são previstas as cargas destas várias barras, sendo feita a previsão de cada barra separadamente.
- Os valores de carga previstos são usados como dados de entrada no método da continuação e, desta forma, para cada ponto de operação previsto, é determinada a margem de carga do sistema, ou seja, a quantidade de carga que pode ser adicionada.
- Faz-se a avaliação da segurança operativa do sistema, comparando a margem de carga obtida a partir de uma carga prevista  $i$  ( $P_{\max}^i$ ), com a carga prevista  $i+1$  ( $P_{prev}^{i+1}$ ), tal que:

$$Se \ P_{prev}^{i+1} < P_{\max}^i \rightarrow OPERAÇÃO NORMAL(I)$$

$$Se \ P_{prev}^{i+1} > P_{\max}^i \rightarrow OPERAÇÃO NORMAL \rightarrow COLAPSO(II)$$

Portanto, se a carga prevista em um instante  $i+1$  ( $P_{prev}^{i+1}$ ) for menor que a máxima carga permitida ( $P_{\max}^i$ ) determinada no instante  $i$ , o sistema irá operar normalmente no instante  $i+1$ . Caso contrário, o sistema irá operar numa condição anormal, que pode resultar no colapso de tensão.

#### 5.0 - RESULTADOS

Com o objetivo de avaliar a ferramenta desenvolvida, um sistema equivalente da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) foi utilizado. Este sistema é formado por 2483 barras e 3961 circuitos.

##### 5.1 Da Série de Cargas

Quatro séries históricas de carga, disponibilizadas por empresas do setor elétrico:

- Séries de Carga 1 e 2: referem-se aos dados coletados por uma empresa do setor energético no período de 01 de janeiro de 1997 à 31 de dezembro de 1997. Os dados são tomados em intervalos de 30 min e correspondem às medições de potência ativa em MW, totalizando 18.000 medições.
- Série de Carga 3: Refere-se aos dados coletados por uma empresa do setor energético no período de 01 de janeiro de 2008 à 06 de julho de 2008. Os dados são tomados em intervalos de 30 min e correspondem às medições de potência ativa em MW, totalizando 9.000 medições.
- Série de Carga 4: refere-se aos dados coletados por uma empresa do setor energético no período de 01 de janeiro de 1998 à 31 de dezembro de 1998. Os dados são tomados em intervalos de 30 min e correspondem às medições de potência ativa em MW, totalizando 18.000 medições.

Os dados de carga disponíveis foram considerados referentes as cargas das quatro barras mais críticas do ponto de vista de tensão, determinadas através dos maiores componentes do vetor tangente. Quando foi considerado que a previsão era feita para quatro barras, o objetivo era mostrar que o programa é capaz tanto de realizar a previsão, quanto avaliar a estabilidade do sistema, para casos nos quais estão disponíveis informações de mais vários barramentos do sistema, sendo a previsão feita de maneira separada (isto é, uma não interfere na outra). A análise de estabilidade, por sua vez, considera a carga prevista em todas as barras no mesmo instante de tempo, ou seja, a análise é feita considerando o efeito conjunto.

Os resultados da previsão de carga para as quatro séries de carga são mostradas nas Figuras 1-4: Com o intuito de verificar a precisão da previsão de cargas, o desempenho é mensurado através do Erro Médio Absoluto Percentual (MAPE), calculado de acordo com (3) e mostrado na Tabela 1.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{P_{real}(t) - P_{prev}(t)}{P_{real}(t)} \right] \times 100\% \quad (3)$$

Onde:

$P_{real}(t)$ : demanda real no instante  $t$

$P_{prev}(t)$ : demanda prevista no instante  $t$

N: número de valores previstos.

Tabela 1 - Erro Médio Absoluto Percentual

Série de Carga	MAPE (%)
1	1,29
2	1,36
3	0,26
4	1,69

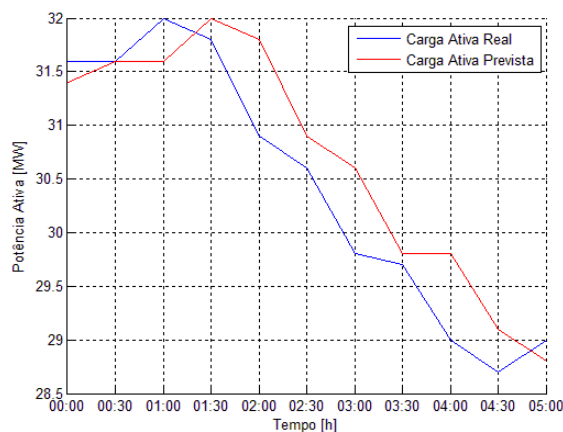


FIGURA 1 - Carga Real e Carga Estimada para a Série de Carga 1

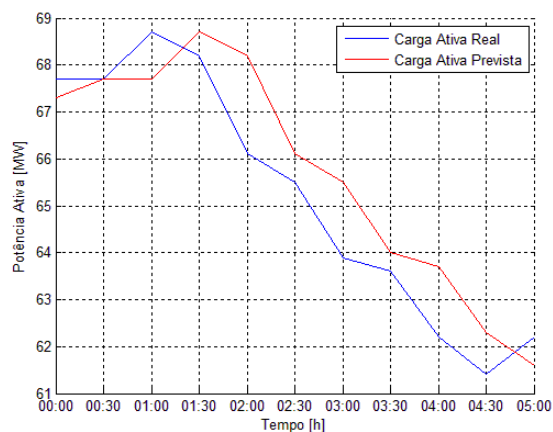


FIGURA 2- Carga Real e Carga Estimada para a Série de Carga 2

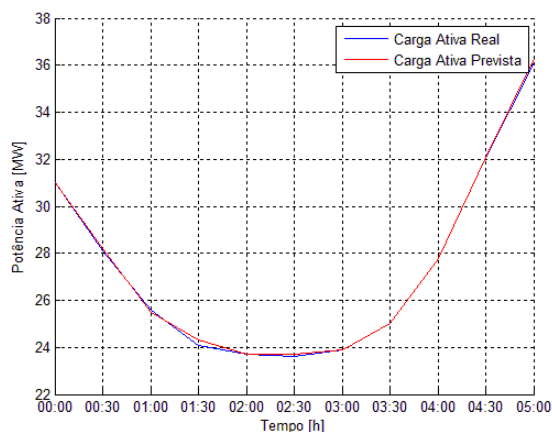


FIGURA 3 - Carga Real e Carga Estimada para a Série de Carga 3

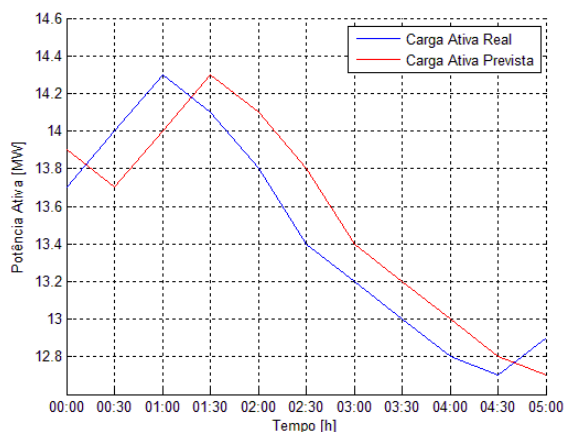


FIGURA 4 - Carga Real e Carga Estimada para a Série de Carga 4

## 5.2 Avaliação da Segurança Operativa

Com as cargas típicas do sistema CEMIG, além das cargas previstas ligadas nas quatro barras mais críticas, o sistema foi carregado utilizando o método da continuação, e a carga máxima foi determinada.

Os resultados obtidos para a carga prevista e a carga máxima, para cada barra com previsão, são apresentados nas Figuras 5 à 8. Observa-se, em vermelho, a carga máxima permitida em cada instante de tempo " $i$ ". Já em azul estão representadas as cargas estimadas no instante de tempo " $i+1$ ". A avaliação da segurança operativa do sistema é feita comparando a margem de carga obtida a partir de uma carga prevista  $i$  ( $P_{max}^i$ ) com a carga prevista  $i+1$  ( $P_{prev}^{i+1}$ ).

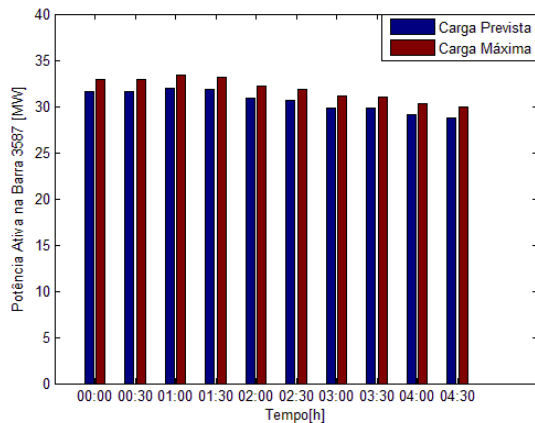


FIGURA 5 - Carga Prevista e Carga Máxima da barra 3587

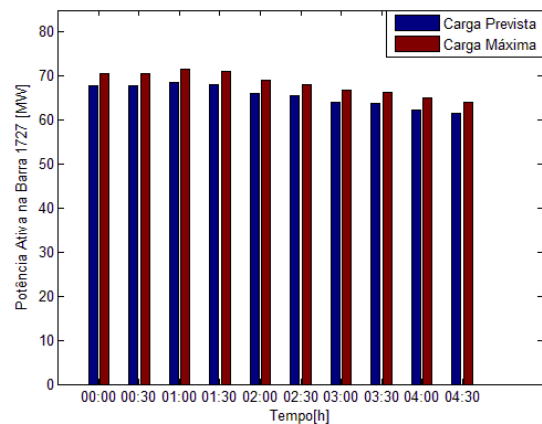


FIGURA 6 - Carga Prevista e Carga Máxima da barra 1727

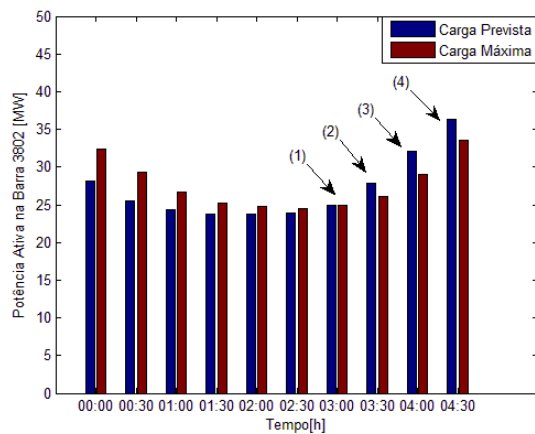


FIGURA 7 - Carga Prevista e Carga Máxima da barra 3802

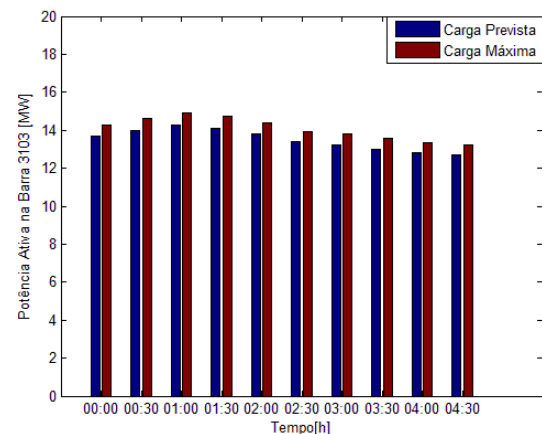


FIGURA 8 - Carga Prevista e Carga Máxima da barra 3103

De acordo com os resultados obtidos e com o critério da seção 4.3, conclui-se que o sistema entraria em colapso a partir das 03:30h. Apesar das barras 3587, 1727 e 3103 não apresentarem nenhum instante de tempo no qual a carga prevista é maior que a carga máxima (atendendo ao critério I), a partir das 03:30h (indicada como ponto 2 no gráfico da Figura 7) a barra 3802 apresenta carga prevista maior que a carga máxima que pode ser atendida pelo sistema (atendendo ao critério II), de modo que sistema entraria em colapso de tensão.

Note que, nos seis primeiros instantes de tempo mostrados no gráfico da Figura 7, o sistema opera em condições normais, com certa folga (principalmente na barra 3802 que posteriormente é responsável por levar o sistema ao colapso). No sétimo instante, indicado como ponto 1 no gráfico da barra 3802, apesar da carga prevista ser menor que a carga máxima, o sistema encontra-se em um condição limite, uma vez que qualquer valor de carga ligeiramente superior ao previsto pode levar o sistema a colapsar. Este ponto, inclusive, já indicaria com antecedência, que seriam necessárias ações de controle que evitassem o colapso do sistema. De fato, este caso indica claramente a aplicabilidade e importância da ferramenta desenvolvida. Do oitavo instante em diante (pontos 2, 3 e 4), todos os casos representam situações de anormais de operação, pois a carga prevista é maior que a carga máxima permitida.

## 6.0 - CONCLUSÃO

A partir da proposição de uma metodologia que permite avaliar a segurança operativa dos sistemas elétricos, este trabalho tratou de problemas relacionados ao suporte de potência reativa que podem resultar no colapso de tensão. O comportamento da carga foi determinado através de uma técnica neuro-fuzzy de previsão de carga. Em seguida, método da continuação e o vetor tangente foram utilizados para obtenção da margem de carga e barras críticas, respectivamente. A interação entre os dois módulos resultou em uma ferramenta que permite avaliar a segurança operativa do sistema em tempo real. Os resultados obtidos considerando um sistema real comprovam sua aplicabilidade na operação e planejamento de sistemas elétricos.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) WAN, H. B., EKWUE A. O., "Artificial neural network based contingency ranking method for voltage collapse", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 22, pp. 349-354, 2000.
- (2) MARQUES, A. B.; TARANTO, G. N.; FALCAO, D.M., "A knowledge-based system for supervision and control of regional voltage profile and security", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.20, no.1, pp.400,407, Feb. 2005
- (3) SANTOS, M.V., ZAMBRONI DE SOUZA, A.C., LOPES, B.I.L., MARUJO, D., "Secondary voltage control system based on fuzzy logic", *Electric Power Systems Research (Print)* , vol. 119, pp. 377-384, 2015.
- (4) ALTRAN, A. B., "Sistema Inteligente para Previsão de Carga Multinodal em Sistemas Elétricos de Potência", Tese de Doutorado, UNESP, Ilha Solteira, 2010.
- (5) LOPES, M. L. M., MINUSSI, C.R., LOTUFO, A. D. P., "Electric Load Forecasting Using a Fuzzy ART&ARTMAP Neural Network", *Applied Soft Computing Journal*, vol.1, pp. 235-244, 2005.
- (6) RIBEIRO, C. V., GOLDSCHMIDT, R. R., CHOREN, R., "Métodos para Previsão de Séries Temporais e suas Tendências de Desenvolvimento", Monografia em Sistemas de Computação, IME, Rio de Janeiro, 2009.
- (7) GUIRELLI, C. R., "Previsão da Carga de Curto Prazo de Áreas Elétricas Através de Técnicas de Inteligência Artificial", Tese de Doutorado, Poli-USP, São Paulo, 2006.
- (8) KIARTZIS, S. J., BAKIRTZIS, A. G., THEOCHARIS, J. B., TSAGAS, Gr., "A Fuzzy Expert System for Peak Load Forecasting. Application to The Greek Power System", 10th Mediterranean Electrotechnical Conference, vol.3, 2000.
- (9) KHOTANZAD, A., ZHOU, E.; ELRAGAL, H., "A neuro-fuzzy approach to short-term load forecasting in a price-sensitive environment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.17, no.4, pp.1273,1282, Nov 2002.
- (10) LIANG, R. H., CHENG, C. C., "Short-term load Forecasting by a neuro-fuzzy based approach" *Electrical Power and Energy Systems*, vol 24, pp. 103-111, 2002.
- (11) HAYKIN, S. "Neural Networks: A Comprehensive Foundation," 2ª ed., India: Pearson Prentice Hall, 2005.
- (12) TOMSOVIC, K., CHOW, M. Y. "Tutorial on Fuzzy Logic Applications in Power Systems," IEEE-PES Winter Meeting in Singapore, Jan 2000.
- (13) MOHN, F. W., ZAMBRONI DE SOUZA, A. C., "Tracing PV and QV curves with the help of a CRIC continuation method," *Power Systems*, IEEE Transactions on , vol.21, no.3, pp.1115,1122, Aug. 2006.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Diogo Marujo** recebeu o grau em engenheiro eletricista em 2010 pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) e de mestre em ciências em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 2013. Atualmente está realizando seu Doutorado na UNIFEI com período sanduíche na Universidade Politécnica da Catalunia (UPC). Suas áreas de interesse são: modelagem e controle de sistemas, energias renováveis e inteligência artificial.



**Marcos V. Santos** é Bacharel em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade do Oeste do Paraná em 2010 e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá em 2013, onde atualmente conduz as pesquisas de seu Doutorado. Suas áreas de atuação são ligadas a estudos de estabilidade de tensão e inteligência artificial.



**Antonio Carlos Zambroni de Souza** recebeu o grau de engenheiro eletricitista em 1987 na Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), de mestre em ciências em engenharia elétrica em 1990 pela Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO) e PhD em engenharia elétrica pela Universidade de Waterloo no Canadá no ano de 1995. Atualmente é Professor Assistente na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Suas áreas de interesse são: análise de estabilidade, sistemas dinâmicos e smart-grids.



**Benedito Isaías de Lima Lopes** nasceu em Pouso Alegre, Minas Gerais. Em 1998 e 2001 recebeu, respectivamente, o grau de bacharel e mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Em 2004 recebeu o grau de Doutor pela mesma instituição. Atualmente é Professor Adjunto na UNIFEI. Suas áreas de interesse são: estabilidade e controle de sistemas dinâmicos e aplicação de técnicas de inteligência artificial.