

Solução Prática para Monitoramento Remoto de Tensão Baseada em Redes Neurais Artificiais

Alex Soto da Silva, Ricardo Caneloi dos Santos
CECS – Universidade Federal do ABC
Santo André, Brasil
alex.silva@ufabc.edu.br, ricardo.santos@ufabc.edu.br

Fernando Bambozzi Bottura, Mário Oleskovicz
EESC, Universidade de São Paulo
São Carlos, Brasil
fernando.bottura@usp.br, olesk@sc.usp.br

Resumo — Este trabalho tem como objetivo a implementação em hardware de um sistema baseado em redes neurais artificiais para o monitoramento remoto da tensão em pontos de interesse de uma rede elétrica. Em uma primeira etapa, estudos e simulações do sistema elétrico adotado foram realizados para definir uma rede neural artificial. Em uma segunda etapa, a rede neural especificada é implementada em hardware e avaliada frente a sinais reais, utilizando-se o software LabVIEW e a plataforma de aquisição de dados CompactDAQ. Os resultados obtidos com sinais reais são sempre comparados com os resultados provenientes de simulações realizadas nos ambientes Matlab e LabVIEW, visando validar o esquema de monitoramento proposto. Conforme observado em laboratório, os resultados obtidos são promissores e indicam que o método pode ser utilizado na prática.

Palavras-chaves — Qualidade da energia elétrica, monitoramento remoto, variações de tensão, aquisição de dados, redes neurais artificiais.

I. INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica (QEE) está relacionada à possível disponibilidade do sinal elétrico sob a forma de uma onda senoidal pura, ou seja, sem alterações na frequência e amplitude [1]. Porém, um sistema elétrico de potência (SEP) está sujeito a diversos fatores que impedem a disponibilidade de um sinal de amplitude e frequência constantes. Esses fatores comprometem a QEE, podendo causar desde o funcionamento inadequado de equipamentos, até a perda de grandes processos industriais, ocasionando perdas econômicas significativas. A medida da QEE considera a continuidade de serviço e a conformidade do sinal elétrico, avaliada por meio dos seguintes parâmetros: distorções harmônicas; flutuações de tensão; variações de tensão de curta duração; desequilíbrio de sistemas trifásicos; transitórios rápidos. Em virtude da frequência de ocorrência, destacam-se os afundamentos de tensão, dado que aproximadamente 87% dos distúrbios envolvendo QEE são representados por tais eventos [1].

Para assegurar níveis aceitáveis de QEE é necessário aplicar metodologias de monitoramento de distúrbios elétricos no SEP. Todavia, este procedimento de monitoramento não é simples e carece de dispendioso investimento financeiro. Além disso, uma das grandes dificuldades na aplicação das metodologias de monitoramento é a escolha dos melhores pontos a serem monitorados, sendo recomendável, muitas vezes, o uso de técnicas de otimização para alocação ótima de medidores de QEE. Outra importante particularidade neste tema é a característica estocástica da ocorrência dos fenômenos de

QEE, indicando que parâmetros pouco controláveis devem ser considerados [2].

Considerando as dificuldades apontadas, o uso de ferramentas de inteligência artificial como Redes Neurais Artificiais (RNA) e ferramentas matemáticas como a Transformada Wavelet, apresentam-se como uma solução viável no tratamento de problemas relacionados à QEE [3]. Nesse sentido, pesquisadores estão buscando ferramentas computacionais e plataformas de *hardware* para minimizar os tempos de desenvolvimento e de execução de novos algoritmos. Dentre as possibilidades existentes, o ambiente de desenvolvimento LabVIEW e a utilização de lógica programável FPGA ganham destaque com relação aos demais métodos, pois permitem grande flexibilidade na implementação desse tipo de aplicação [4-5].

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar a metodologia utilizada para o desenvolvimento de um protótipo, implementado em *hardware* e baseado em RNAs, para o monitoramento das variações de tensão em seis diferentes pontos de um Sistema de Distribuição (SD). O esquema proposto permite estimar os níveis de tensão nos seis pontos do SD por meio dos sinais trifásicos de tensão e corrente exclusivamente medidos na subestação da concessionária. Cabe ressaltar que é possível ampliar o número de pontos monitorados, conforme discutido no decorrer do trabalho.

II. ETAPAS DO ESQUEMA DE MONITORAMENTO

O esquema proposto neste artigo se divide em duas partes distintas, sendo a primeira relativa à definição das RNAs que estimam as tensões nos seis pontos de interesse do SD, já discutida em [6]. Enquanto a segunda parte, foco principal desse trabalho, apresenta o processo adotado para alocar e avaliar as RNAs em *hardware*, mostrando a viabilidade técnica desse projeto. A Fig. 1 apresenta todas as etapas envolvidas no esquema proposto, sendo as mesmas detalhadas a seguir.

A. Definição das RNAs

Etapa 1 – Os dados necessários para a modelagem do SD adotado são levantados e introduzidos no software ATPDRAW, onde o sistema é modelado e simulado. Os dados principais são: parâmetro de condutores, equivalente da subestação, dados dos transformadores e cargas.

Etapa 2 – As faltas monofásicas são simuladas em pontos pré-determinados do SD, formando um banco de dados para o treinamento das RNAs. Esse banco de dados consta dos sinais de tensão e corrente medidos no barramento principal

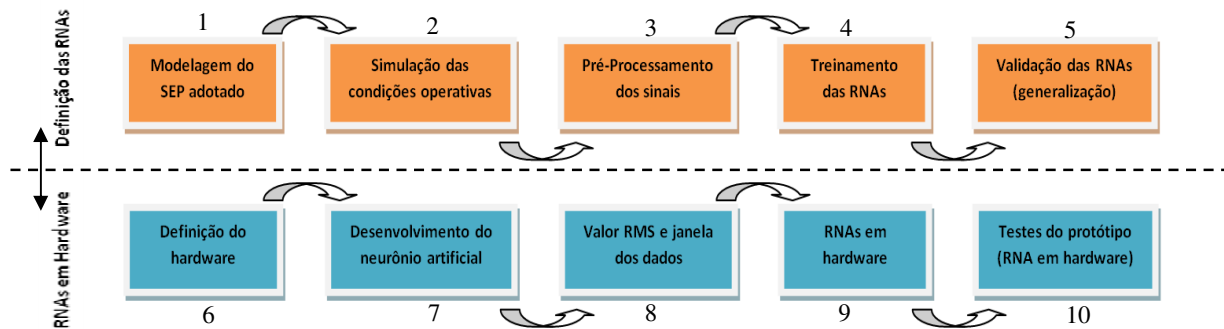


Fig. 1. Etapas envolvidas no esquema de monitoramento proposto

da subestação e dos sinais de tensão medidos em cada ponto de monitoramento especificado.

Etapa 3 – São extraídos os valores RMS dos sinais de tensão e corrente provenientes das simulações. Para tal cálculo é utilizada uma janela deslizante de meio ciclo, que neste caso significa 64 amostras, visto que a taxa de amostragem utilizada é de 128 amostras por ciclo.

Etapa 4 – Os valores RMS dos sinais na subestação e nos pontos de monitoramento formam, respectivamente, as matrizes de entrada e saída para o treinamento das RNAs. Por meio de um processo empírico chega-se a melhor topologia de RNA.

Etapa 5 – Novas situações de faltas monofásicas são geradas e aplicadas às RNAs, possibilitando comparar a resposta fornecida pelas mesmas e as respostas observadas na simulação com ATP. Uma rede bem treinada, onde houve generalização, deve apresentar o mesmo valor da tensão eficaz observada na simulação com o ATP, para o mesmo ponto monitorado.

B. RNAs em Hardware

Etapa 6 – O PC (*hardware*) onde serão implementadas as RNAs em LabVIEW, bem como a plataforma de aquisição de dados CompactDAQ, para a aquisição dos sinais de tensão e corrente, são especificados. É importante destacar que o *hardware* selecionado é facilmente encontrado no mercado, permitindo estender a aplicação em questão de uma forma rápida e padronizada. Além disso, o *software* associado ao *hardware* selecionado apresenta uma interface extremamente amigável, o que auxilia o projetista durante o desenvolvimento do protótipo. A utilização dessa plataforma é justificada pelas importantes características que a mesma apresenta na execução dos algoritmos. O CompactDAQ possui um chassi responsável pela comunicação entre os módulos de entrada e saída e o PC. No computador os dados analógicos e digitais provenientes dos módulos de aquisição são processados pelas rotinas desenvolvidas em LabVIEW. Quando for o caso, o PC pode acionar/controlar cargas por intermédio dos módulos de saída.

Etapa 7 – O neurônio artificial com função linear e função tangente hiperbólica é desenvolvido no ambiente LabVIEW. A rotina responsável pela geração do neurônio artificial foi desenvolvida para fazê-lo adaptativo, detectando automaticamente o número de neurônios e camadas da RNA, podendo este ser utilizado em qualquer posição da mesma.

Etapa 8 – Nesta etapa são implementadas as rotinas para a execução da janela deslizante e para a obtenção do valor RMS. Essa rotina é desenvolvida de acordo com a etapa 3, sendo constituída por um buffer de 128 amostras (1 ciclo), onde as últimas 64 amostras são descartadas toda vez que 64 novas amostras são consideradas. As 128 amostras contidas no buffer são utilizadas para se calcular o valor RMS.

Etapa 9 – As RNAs desenvolvidas em LabVIEW recebem sinais (tensão e corrente) provenientes da plataforma de aquisição de dados CompactDAQ. Assim, as RNAs são executadas em *hardware* (PC), processando sinais de tensão e corrente, tratados pelos módulos de entrada do CompactDAQ.

Etapa 10 – A eficiência e a precisão do protótipo de monitoramento baseado em RNAs são avaliadas através de testes práticos, por meio de sinais elétricos reais com níveis compatíveis aos encontrados nas subestações de energia elétrica. O procedimento utilizado é padrão para testes de IEDs convencionais, sendo realizado por meio do *software* ATP e da caixa de testes CMC 256plus da Omicron. Os sinais das simulações de falta no SD são lidos pela caixa de testes e reproduzidos nas suas saídas, sendo, na sequência, aplicados aos módulos de aquisição presentes na plataforma CompactDAQ. Por meio dos resultados obtidos nos testes práticos é possível comparar a resposta apresentada pelas RNAs em *hardware* e as respostas das simulações com o ATP. Um bom desempenho do esquema proposto significa que a tensão apresentada para um determinado ponto de monitoramento é praticamente igual àquela proveniente da simulação com o ATP para o mesmo ponto.

III. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO EM ESTUDO

Visando avaliar o protótipo desenvolvido um SD foi modelado e simulado previamente por meio da interface gráfica do *software* ATPDraw [8].

Os dados utilizados na modelagem do SD são reais e foram obtidos junto a uma concessionária regional de energia elétrica. As informações referentes ao SD são compostas pelo equivalente do sistema a partir da subestação de energia considerada, dados do transformador de potência da subestação, parâmetros dos condutores utilizados, dados das cargas alocadas, entre outros. A fonte de tensão utilizada nas simulações é do tipo 14 em série com uma impedância, sendo o transformador de potência baseado no modelo saturável com dois enrolamentos [7], com potência nominal de 15/20MVA e conexão Y- Δ entre o primário e o secundário. O sistema elétrico adotado neste projeto é mostrado na Fig. 2 e alguns de seus principais parâmetros são apresentados na Tabela I e Tabela II.

Para gerar os conjuntos de treinamento das RNAs e, posteriormente, para a avaliação do protótipo desenvolvido, foram aplicadas faltas em vinte diferentes pontos do sistema elétrico adotado, considerando-se as seguintes variações:

- Impedância de falta = 0 Ω , 10 Ω , 20 Ω , 30 Ω e 40 Ω .
- Ângulos de incidência de falta = 0° e 90°.
- Tipo de falta = AN, BN e CN (faltas monofásicas, devido a sua maior incidência nos SD) [1].

Os seis pontos monitorados aparecem na Fig. 2 na cor verde (MR1, MR2, MR3, MR4, MR5 e MR6), enquanto os vinte pontos de falta aparecem na cor vermelha. É importante ressaltar que tanto os pontos para monitoramento, como os pontos de faltas são escolhidos de acordo com os critérios da concessionária [6]. O computador com o LabVIEW e a plataforma de aquisição de dados encontram-se na subestação principal (também destacada na cor verde na Fig. 2), trazendo como vantagem a possibilidade de estimar remotamente a tensão nos pontos de interesse, dispensando a necessidade da instalação de seis medidores dedicados conectados

TABELA I. DADOS DA FONTE DE TENSÃO E DO MODELO RL MUTUAMENTE ACOPLADO.

Parâmetro	Valor
Amplitude (V)	71.851,699
Frequência (Hz)	60
Fase (°)	0°
Resistência de sequência zero (Ω/m)	20,805
Indutância de sequência zero (mH/m)	203,721
Resistência de sequência positiva (Ω/m)	4,062
Indutância de sequência positiva (mH/m)	52,5397

TABELA II. DADOS PARA A MODELAGEM DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA DA SE.

Parâmetro	Valor
Relação de transformação (a)	3,809524
Corrente nominal do primário (I_p)	131,215970 A
Corrente nominal do secundário (I_s)	499,870363 A
Deslocamento angular	30°
Resistência do primário	0,054695 Ω
Resistência do secundário	0,79376 Ω
Indutância do primário	1,628 mH
Indutância do secundário	23,6258 mH
Resistência de magnetização	1 M Ω

localmente nos pontos MR1 a MR6.

IV. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Conforme já relatado, o objetivo deste projeto é desenvolver um protótipo baseado em RNAs, para monitorar remotamente seis pontos distintos do sistema de distribuição adotado (Fig. 2). A justificativa para uma solução baseada em RNAs, bem como todos os passos para a especificação e validação das mesmas, é minuciosamente detalhada em [6]. Para a execução desse projeto foram utilizados o ambiente de desenvolvimento LabVIEW e o console CompactDAQ. O

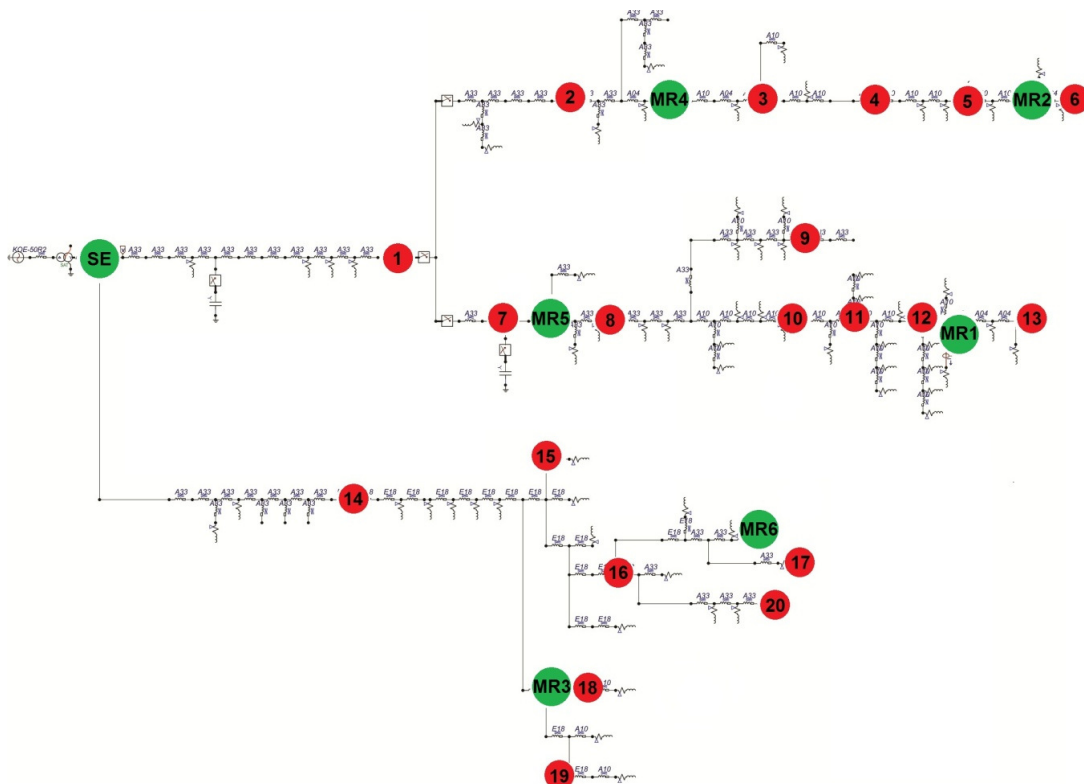


Fig. 2. Sistema de distribuição (SD) modelado, apresentando os pontos de monitoramento remoto (MR n), os pontos de faltas (1 a 20) e a subestação (SE)

uso do LabVIEW se justifica pela interface amigável (programação gráfica), possibilidade de reutilização dos códigos criados pelo usuário (VI - *Virtual Instruments*), grande quantidade de funções disponíveis, recursos para a validação de rotinas e facilidade para depuração de projetos. Já com relação ao console CompactDAQ, este permite o uso de módulos de entrada e saída (I/O) oportunos para a aquisição direta de sinais provenientes dos Transformadores de Correntes (TCs) e Transformadores de Potenciais (TPs).

A. Implementação das RNAs

As RNAs trabalham a partir dos valores RMS de tensão e corrente, extraídos por meio de janelas de dados de 1 ciclo, com taxa de amostragem de 128 amostras/ciclo de 60 Hz e deslocamento de $\frac{1}{2}$ ciclo. As RNAs possuem seis entradas, sendo três de tensão (fases A, B e C) e três de corrente (fases A, B e C). Todas as RNAs possuem a mesma topologia (15-10-1), diferindo uma da outra com relação aos valores de seus pesos e polarização. Também é importante ressaltar que para cada ponto monitorado existem três RNAs, sendo uma para cada fase. Dessa forma, dezoito RNAs foram especificadas e implementadas em LabView para o monitoramento de seis pontos de interesse do SD. A Fig. 3 ilustra a topologia da RNA utilizada [6].

B. Janelamento dos sinais

A técnica utilizada para fazer o janelamento do sinal emprega um *buffer* capaz de alocar um total de k amostras, ou seja, a mesma quantidade de amostras utilizada para representar um ciclo. Após a aquisição das primeiras k amostras o valor RMS do sinal é calculado, sendo, posteriormente, este valor calculado a cada meio ciclo ($k/2$ amostras). É importante destacar que a cada meio ciclo as $k/2$ amostras mais antigas são descartadas e as $k/2$ amostras mais recentes são consideradas para a determinação do valor RMS do sinal. Com essa técnica é possível calcular o valor RMS janelado a cada meio ciclo. Apesar da variável k poder assumir qualquer valor na rotina desenvolvida, neste caso foi adotado $k = 128$.

C. Rotina principal

Para receber os valores eficazes de tensão e corrente da rotina *Janelamento* e disponibilizá-los na entrada da rotina *RNAs*, foi elaborada uma rotina principal, que executa o processamento de todas as redes neurais para os pontos MR1 a MR6. Com a utilização do CompactDAQ, todo o processamento é feito pelo PC, que em situações normais consegue facilmente executar a rotina principal em um tempo inferior a 8,33 ms, ou seja, meio ciclo de 60 Hz.

A Fig. 4 ilustra a relação entre a rotina principal e as subrotinas *Janelamento* e *RNAs*. Com relação à esta figura, observa-se que os módulos I/O (NI 9225 e NI 9227) recebem os sinais dos TCs e TPs, tratam adequadamente esses sinais e os enviam para a rotina *Janelamento*, onde os valores RMS são calculados a cada meio ciclo. Na sequência, tais valores são aplicados na rotina *RNAs* que estima o valor eficaz da tensão em cada ponto de interesse. A rotina principal gerencia as demais rotinas, sendo que todas utilizam recursos de processamento do PC. Sobre os módulos é importante destacar as seguintes informações:

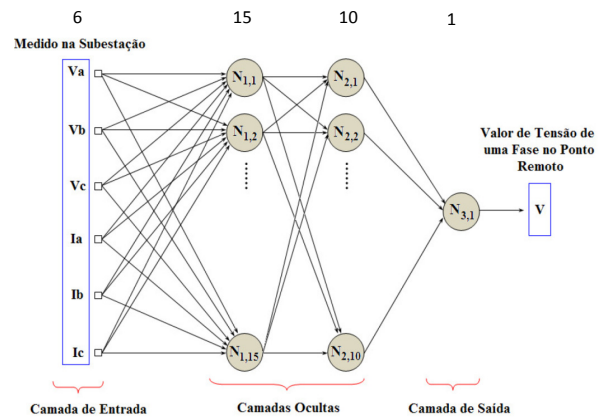


Fig. 3. Topologia das RNAs (15-10-1)

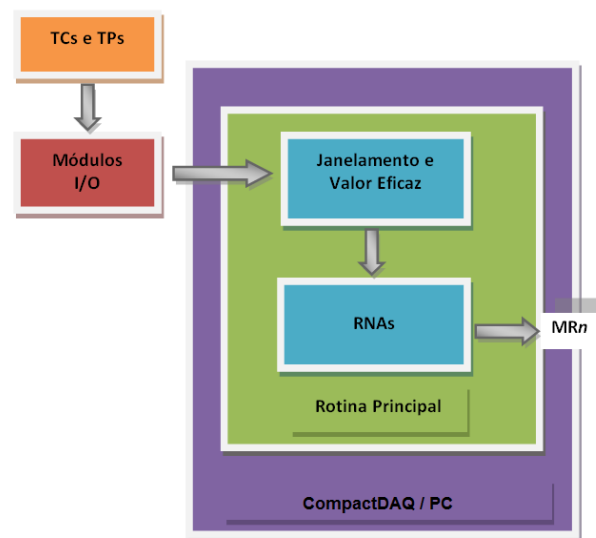


Fig. 4. Estrutura do CompactDAQ

- módulo NI 9225: Possui três entradas de tensão de 300 Vrms, com resolução de 24 bits, sendo ideal para a conexão com TPs;
- módulo NI 9227: Possui quatro entradas de corrente de 5 Arms, com resolução de 24 bits, sendo ideal para a conexão com TCs;
- Chassi DAQ-9172: Chassi para interface entre o módulo LabVIEW (PC) e os módulos de aquisição.

O sistema de monitoramento remoto, baseado em RNA, foi exaustivamente testado no LabVIEW, uma vez que esse ambiente de programação disponibiliza uma grande gama de recursos virtuais para validação e depuração de projetos. A partir desse procedimento, observou-se que os critérios de tempo e precisão foram atendidos. No entanto, tal verificação confirma o perfeito funcionamento das rotinas desenvolvidas, não levando em consideração o impacto do *hardware*, como, por exemplo, o efeito da resolução dos conversores A/D (presentes nos módulos I/O) e possíveis atrasos de propagação dos sinais durante a execução das rotinas. Além disso, a presença de ruídos sobrepostos aos sinais faltosos também não foi considerada.

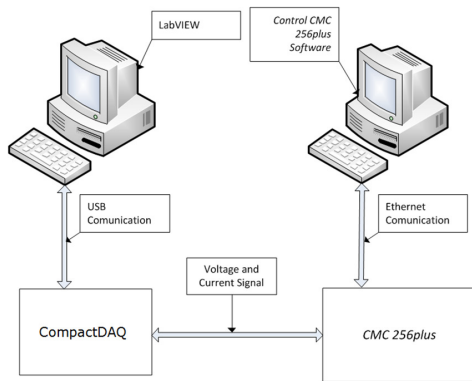


Fig. 5. Montagem em laboratório para teste da RNA 15-10-1

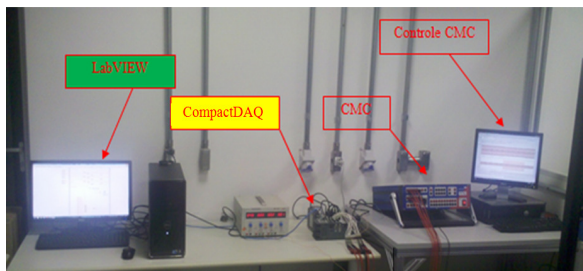


Fig. 6. Equipamentos utilizados para teste da RNA 15-10-1

V. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO PROTÓTIPO

Para a avaliação do protótipo foi elaborado o esquema mostrado na Fig. 5, fisicamente representado na Fig. 6. Conforme observado, os arquivos do ATP são enviados do PC *Control CMC* para a caixa de teste *CMC 256Plus*, que reproduz em seus terminais de saída os sinais da simulação do SD com níveis equivalentes aos TCs e TPs. Esses sinais são aplicados aos módulos de entrada do CompactDAQ que, após tratá-los adequadamente, disponibiliza tais sinais para serem processados pelas rotinas desenvolvidas em LabVIEW.

O ponto de falta 20 foi escolhido para avaliar desempenho da RNA em LabVIEW, sendo que neste caso a resistência de falta é 40Ω e ângulo de incidência da falta é 90° . A Tabela III apresenta a diferença entre os resultados gerados com o esquema proposto e os resultados provenientes do ATP.

Como pode ser verificado, os erros apresentados na Tabela III, onde as simulações realizadas no ATP são assumidas como referência, são bem pequenos, indicando o bom desempenho do esquema proposto e sua viabilidade para as aplicações práticas.

A título de exemplo, a Fig. 7 apresenta o resultado do monitoramento remoto de tensão para os pontos MR1 a MR6, respectivamente. Por uma questão de objetividade e clareza, neste artigo foi apresentado somente o resultado de uma fase para cada ponto, porém resultados similares são verificados para todas as demais fases de cada ponto monitorado. Nesta figura é importante observar que os valores simulados (cor verde) e obtidos na prática (cor azul) são bastante similares, validando as RNAs previamente testadas no Matlab e, principalmente, provando que é possível implementar em *hardware* e utilizar uma solução baseada em RNAs na prática.

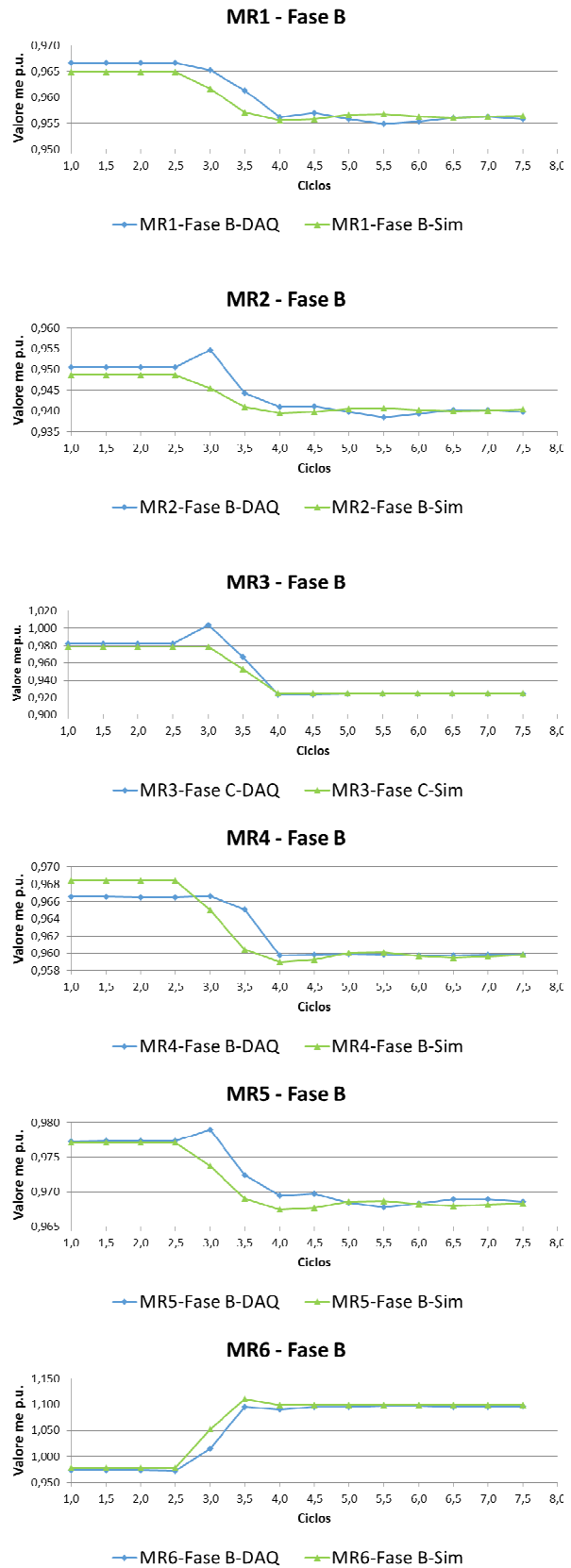


Fig. 7. Comparação entre os resultados obtidos com o ATP/Matlab e obtidos com o esquema proposto

TABELA III. ATP VERSUS COMPACTDAQ PARA FALTA NO PONTO 20

	Erro pré-falta			Erro pós-falta		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
MR1	0,166%	0,676%	0,660%	0,187%	0,234%	0,223%
MR2	0,001%	0,454%	0,787%	0,600%	0,384%	0,731%
MR3	0,032%	0,072%	0,012%	0,756%	0,404%	0,978%
MR4	0,168%	0,310%	0,211%	0,318%	0,069%	0,074%
MR5	0,122%	0,067%	0,031%	0,700%	0,277%	0,177%
MR6	1,239%	0,509%	0,215%	8,600%	2,397%	0,519%

Conforme constatado na Fig. 7, cabe ressaltar que durante o período transitório existe uma diferença entre os valores provenientes das simulações e do CompactDAQ. No entanto, esse fato não constitui um problema, uma vez que a proposta desse projeto é registrar o valor final (afundamento ou elevação) da tensão eficaz em seis pontos de interesse, na ocorrência de curto-circuito em um dos vinte diferentes pontos do sistema de distribuição adotado. Nesse sentido, o esquema proposto mostra-se bastante preciso, seja na condição pré-falta, como na condição pós-falta – ver Tabela III e Fig. 7.

VI. CONCLUSÃO

O esquema proposto para o monitoramento remoto de tensão em seis pontos distintos de um sistema de distribuição, utilizando somente sinais presentes na subestação, se mostrou bastante eficiente. Tal esquema é baseado em RNAs e, portanto, valida o uso de tal técnica de inteligência artificial nas aplicações práticas.

Esse trabalho atingiu seu objetivo, uma vez que a sua principal meta era implementar em *hardware* e mostrar a viabilidade prática do esquema de monitoramento remoto de tensão, baseado em RNA, proposto por [6].

O uso do ambiente de desenvolvimento LabVIEW e da plataforma de aquisição de dados CompactDAQ tornam os tempos de criação e avaliação de projeto sensivelmente inferiores aos métodos convencionais de programação e depuração.

As simulações executadas no ATP e o uso da caixa de teste conferem confiabilidade aos resultados obtidos, pois os procedimentos adotados para avaliar o esquema baseado em RNAs em *hardware* é similar aos métodos utilizados para a avaliação dos ajustes de IEDs convencionais.

A Tabela III e a Fig. 7 ilustram a boa precisão apresentada pelo esquema proposto nas condições de pré-falta e pós-falta, sendo este o comportamento esperado para o monitoramento remoto.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o CNPq pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa – processo número: 159643/2011-2.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] Dugan, R. C., Mcgranaghan, M. F., Santoso, S. and Beaty, H. W., *Electrical Power Systems Quality*, 2.ed, New York: McGraw-Hill, 2003.
- [2] Olguin, G., Vuinovich, F. and Bollen, M. H. J., "An Optimal Monitoring Program for Obtaining Voltage Sag System Indexes", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 21, pp. 378- 384, 2006.
- [3] Devaraj, D., Radhika, P., "Discrimination of Power Quality Disturbances Using Combined Mathematical Transforms and Artificial Neural Network", *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*, 2008.
- [4] Q. TANG, Y. WANG e S. GUO, "Design of Power System Harmonic Measurement System Based on LabVIEW", *Fourth International Conference on Natural Computation, 2008. ICNC '08.*, 2008.
- [5] J. CHEN e T. TANG, "Power quality analysis based on LABVIEW for current power generation system", *2012 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2012.
- [6] Bottura, F. B., Branco, H. M. G. C., Fernandes, R. A. S., Oleskovicz, M. "Redes Neurais Artificiais Aplicadas ao Monitoramento Remoto dos Níveis de Tensão em um Sistema de Distribuição", *X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, pp. 363 – 368, 2011.
- [7] *Alternative Transients Program Rule Book*, Leuven EMTP Center, 1987.
- [8] Prikler, L.; Hoidalen H.K., *AtpDraw Version 3.5 For Windows 9x/Nt/2000/Xp – User's Manual*. Sinef Energy Research, Trondheim, Noruega, 2002.