

Classificação de Distúrbios de Qualidade de Energia Elétrica Empregando Redes Neurais Artificiais

M. A. Araújo, R. A. Flauzino, O. E. Batista, L. A. Moraes, C. H. R. Martins

Departamento de Engenharia Elétrica e Computação

Universidade de São Paulo (USP)

São Carlos, Brasil.

marcel.araujo@usp.br, raflauzino@sc.usp.br, oureste.batista@usp.br, lucas.moraes@usp.br;

martins.cesar@usp.br

Abstract— The increased of the requirement on the part of regulators agency and consumer has intensified the search for better power quality indices. For such, more and more studies of methods capable of identifying generating sources of power quality disturbances are required. In this way, it was seek to eliminate, or at least reduce these disturbances, as efficiently as possible, and so provide greater power quality, reliability and continuity to consumers. In this context, this paper exposes a method of classification of power quality disturbances through the use of artificial neural networks. This method is able to rank the top five types of disturbances, which are: voltage sags, voltage swell, impulsive transients, momentary interruption, and harmonic distortion.

Index Terms— artificial neural network, multilayer perceptron, power quality, power system.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente a qualidade da energia elétrica é um requisito de grande importância para as concessionárias de energia, pois está diretamente relacionada a competitividade de praticamente todos os setores industriais e de serviços. Sobretudo nas últimas duas décadas aconteceram várias mudanças no setor elétrico, tais como a alteração da natureza das cargas, diversificação dos tipos de cargas, e o surgimento de novas tecnologias de geração e inserção de energia na rede elétrica. Tais alterações afetaram de forma negativa a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) promovendo o aumento dos estudos relacionados a essa área e a busca por qualidade passou a ser preocupação não apenas de órgão reguladores, mas também de consumidores e agentes diversificados do setor elétrico nacional [1-4].

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), tendo em vista a importância da QEE, inicialmente publicou resoluções exigindo das concessionárias de energia elétrica o cumprimento indicadores de qualidade no fornecimento. Dentre essas resoluções primeiramente estabelecidas pela ANEEL, pode-se destacar as de números 024/2000 [5] e 505/2001 [6]. A primeira trata da continuidade do fornecimento da energia elétrica, e a segunda da

conformidade de tensão em regime permanente. Além disso, posteriormente a ANEEL elaborou um pacote de diretrizes englobando os principais tópicos correlatos a QEE denominado “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST”, contando com a colaboração de outros representantes do setor elétrico brasileiro. O Módulo 8 do PRODIST [7] visa estabelecer os procedimentos relativos à QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado, a com a intenção de centralizar todos os aspectos de regulação a serem seguidos pelas empresas concessionárias e permissionárias de serviços de distribuição de energia elétrica [8].

Posto isto, cabe ressaltar que o conceito de QEE está diretamente vinculado a um conjunto de várias alterações que um sistema elétrico pode sofrer, mas pode-se defini-lo como sendo qualquer problema que ocorra na tensão, corrente ou frequência, e que resulta na falha ou má operação de equipamentos de consumidores [2-4].

Ademais, via de regra a QEE está associada à qualidade da tensão, uma vez que o fornecedor de energia consegue apenas controlar a qualidade da mesma, mas não tem controle sobre a corrente que cada carga pode requerer, assim, o padrão aceito com respeito à qualidade da energia é manter o fornecimento de tensão dentro de certos limites [1-4].

Existem diversos tipos de distúrbios relacionados à qualidade da energia, que podem ser classificados em categorias que variam quanto ao efeito, duração e intensidade. Estes distúrbios podem ser originados tanto nos sistemas e/ou equipamentos das empresas concessionárias como dos consumidores. O fato é que esses distúrbios quaisquer que sejam, precisam ser reconhecidos para que a qualidade da energia possa ser melhorada [2,3].

II. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Há diversos distúrbios que estão relacionados à QEE, logo são necessários métodos e estratégias para reconhecê-

los e assim fomentar ações e medidas para solucionar mitigá-los de forma eficiente melhorando a qualidade da energia para atender as necessidades dos consumidores.

Neste contexto, para o desenvolvimento da proposta apresentada neste artigo foram selecionados cinco desses distúrbios para serem classificados, sendo que cada um possui uma característica específica que será distinguida por uma Rede Neural Artificial (RNA). A RNA será capaz de reconhecer as características dos distúrbios e fará a classificação destes em: afundamento de tensão, elevação de tensão, transitórios impulsivos, interrupção momentânea, e distorção harmônica.

O afundamento de tensão, ilustrado na Fig. 1, pode ser definido por qualquer decréscimo na magnitude da tensão que resulte em níveis entre 0,1 e 0,9 p.u. Geralmente está associado à ocorrência de curtos-circuitos nos sistemas elétricos [1-4].

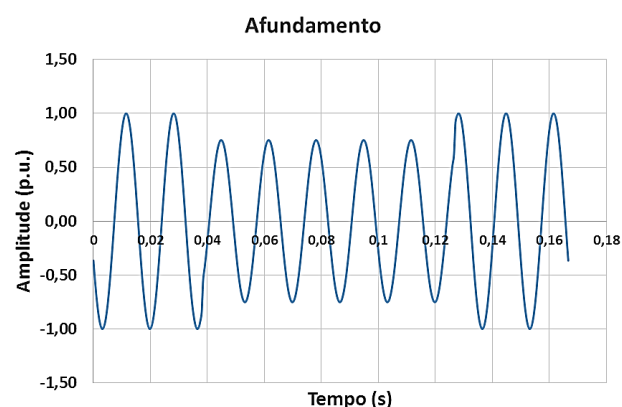


Figura 1: Gráfico ilustrativo de um afundamento de tensão.

Já a elevação de tensão, ilustrada na Fig. 2, pode ser definida por qualquer acréscimo na magnitude da tensão que resulte em níveis entre 1,1 e 1,8 p.u. Na maioria das vezes também está associado à ocorrência de curtos-circuitos nos sistemas elétricos [1-4].

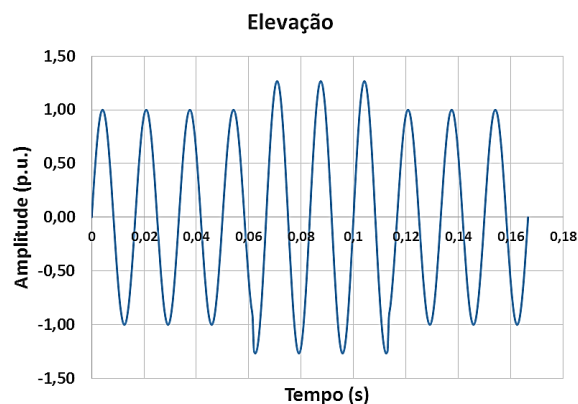


Figura 2: Gráfico ilustrativo de uma elevação de tensão.

Por outro lado, um transitório impulsivo, ilustrado na Fig. 3, é definido como uma súbita alteração não desejável no sistema, refletido nas formas de onda da tensão ou corrente, sendo unidirecional na sua polaridade, e comumente causado por descargas atmosféricas [2-4, 9].

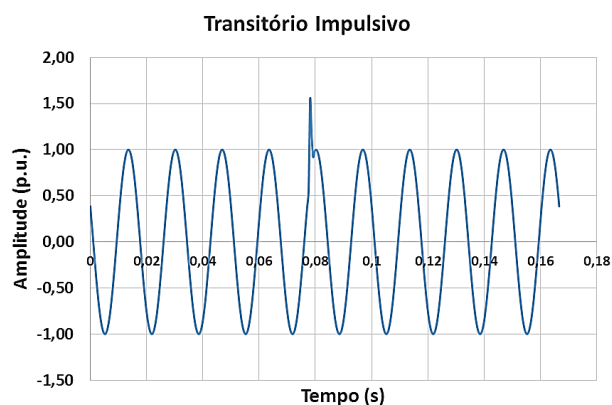


Figura 3: Gráfico ilustrativo de um transitório impulsivo.

Uma interrupção de tensão, ilustrada na Fig. 4, pode ser caracterizada por níveis de tensão abaixo de 0,1 p.u., e geralmente ocorre quando há uma falta permanente no sistema [2-4, 9].

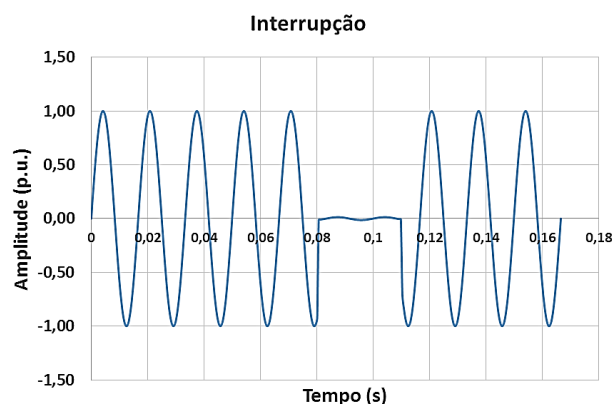


Figura 4: Gráfico ilustrativo de uma interrupção de tensão.

Por fim, uma distorção harmônica, ilustrada na Fig. 5, acontece quando um sinal de tensão é composto por outros espectros de frequência além da fundamental, sendo habitualmente provocado por cargas não-lineares [3-4, 10].

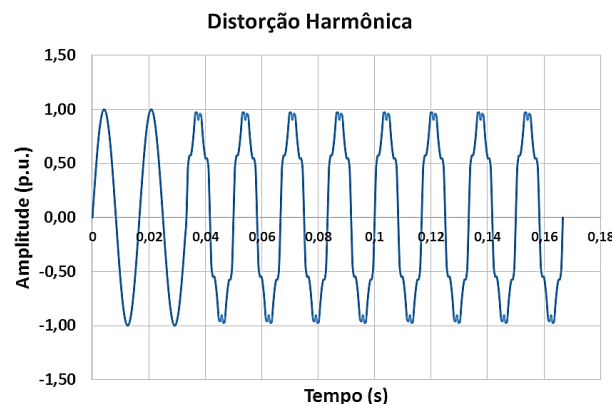


Figura 5: Gráfico ilustrativo de um sinal com distorção harmônica.

III. METODOLOGIA

Da literatura sabe-se que há vários recursos e meios de se realizar a classificação de distúrbios com estes relacionados à QEE, dos quais se destacam as RNAs e Transformada Wavelet [11-14].

Contudo, na pesquisa deste artigo serão usadas RNAs baseadas em redes *Perceptron* Multicamadas (PMC) com algoritmo de treinamento *backpropagation*, as quais têm uma das arquiteturas mais versáteis quanto à aplicabilidade, sendo empregadas em aproximação universal de funções, reconhecimento de padrões, identificação e controle de processos, previsão de series temporais e otimização de sistemas [15-17].

Não obstante, a partir dos conceitos apresentados em [15-17] foram utilizadas redes especialistas, conforme demonstrado pela Fig. 6, para cada classe de distúrbio. Dessa forma cada uma das redes especialistas se responsabilizou por reconhecer as características peculiares referentes a cada distúrbio. Esta configuração fornece melhores resultados que outras estratégias mais generalistas, além de reduzir o esforço computacional utilizado nas fases de treinamento e ajuste das topologias. Além disso, pela Fig. 6, infere-se que um sinal elétrico de tensão contendo um dos 5 distúrbios estudados passará pelas cinco redes e a que apresentar saída igual a "1" indicará qual o tipo de distúrbio de qualidade presente no sinal.

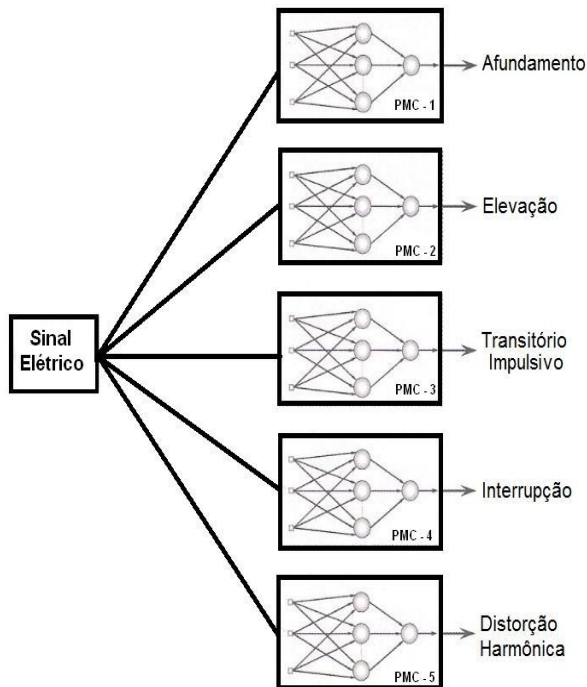


Figura 6: Configuração da rede especialista responsável pela classificação dos 5 distúrbios de QEE.

Ademais, para implementação das redes PMCs desta pesquisa foi estabelecido o número de entradas de cada uma dessas redes igual a 288 entradas, que correspondem a um sinal de tensão simulado e amostrado em 32 amostras/ciclo e 9 ciclos. Os sinais de tensão com os respectivos distúrbios foram gerados por meio do software ATPDraw e as redes foram implementadas pelo software MATLAB.

Sendo assim, foram gerados 200 sinais de tensão, divididos igualmente para cada um dos 5 tipos de distúrbios, ou seja, 40 sinais de tensão para cada distúrbio de qualidade, e para realizar o treinamento utilizaram-se 160 destas amostras (32 amostras para cada distúrbio de QEE) e para os testes as 40 amostras restantes (8 para cada distúrbio).

Não obstante, em virtude de as saídas das redes PMC fornecerem valores reais, foi preciso utilizar um pós-processamento no conjunto de teste, e o método usado para tanto foi o do arredondamento simétrico, no qual se a saída for menor que 0.5 arredonda-se para 0, caso contrário arredonda-se para 1.

Sendo assim, os PMCs de cada rede são constituídos por 288 entradas, uma camada escondida, uma saída, e fazem uso da função de ativação logística. Ressalta-se que a partir dos vários testes realizados foram selecionadas as melhores redes para esta aplicação e as mesmas acabaram por possuir camadas escondidas com diferentes números de neurônios, sendo que a quantidade de neurônios testada para as redes foi: 20, 25, 30, 35 e 40, utilizou-se uma taxa de aprendizagem $\eta = 0.1$, uma taxa de precisão $\varepsilon = 10^{-6}$, e o *momentum* no valor de 0.9.

Dessa forma, as redes implementadas podem ser enumeradas segundo o tipo de distúrbio que deve classificar e segundo o número de neurônios da camada escondida da seguinte forma:

- ✓ PMC - 1 = rede para classificar Afundamento contendo 35 neurônios na camada escondida;
- ✓ PMC - 2 = rede para classificar Elevação contendo 35 neurônios na camada escondida;
- ✓ PMC - 3 = rede para classificar Transitórios Impulsivos contendo 25 neurônios na camada escondida;
- ✓ PMC - 4 = rede para classificar Interrupção contendo 35 neurônios na camada escondida;
- ✓ PMC - 5 = rede para classificar Distorção Harmônica contendo 25 neurônios na camada escondida.

IV. RESULTADOS

Após a codificação e configuração das redes especialistas para classificação dos distúrbios já descritos cabe agora o treinamento e os testes de validação para a mesma, ressaltando que devido aos inúmeros procedimentos realizados serão expostos apenas os resultados finais de tais passos.

Dessa maneira, após o processo de treinamento empregando as 160 amostras selecionadas, como mencionado anteriormente, tem-se como resultado do mesmo a apresentação das saídas desejadas (d) para cada uma das PMCs e dos distúrbios de QEE respectivamente, segundo a Tabela 1.

Ademais, cabe também apresentar as características e parâmetros obtidos para cada rede no processo de treinamento, sendo que a Tabela 2 demonstra quais os números de épocas e tempo de treinamento para cada uma das redes especialistas implementadas. Já as Figs. 7, 8, 9, 10 e 11 apresentam os gráficos relativos aos Erros Quadráticos Médios (EQM) versus o número de épocas correspondentes.

Tabela 1: Saídas desejadas para cada PMC e tipo de distúrbio de QEE.

	d (PMC1)	d (PMC2)	d (PMC3)	d (PMC4)	d (PMC5)
Afundamento	1	0	0	0	0
Elevação	0	1	0	0	0
Transitório Impulsivo	0	0	1	0	0
Interrupção	0	0	0	1	0
Distorção Harmônica	0	0	0	0	1

Tabela 2: Parâmetros dos treinamentos das redes PMC.

PMC	Épocas	Tempo [min]
PMC - 1	91	0,6983
PMC - 2	122	0,8238
PMC - 3	119	1,0569
PMC - 4	203	1,2996
PMC - 5	141	0,9866
Total	676	4,8652

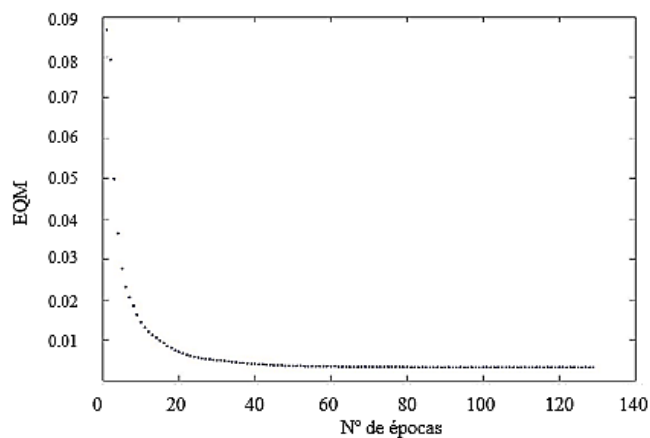


Figura 7: Gráfico de EQM x Épocas para o PMC-1.

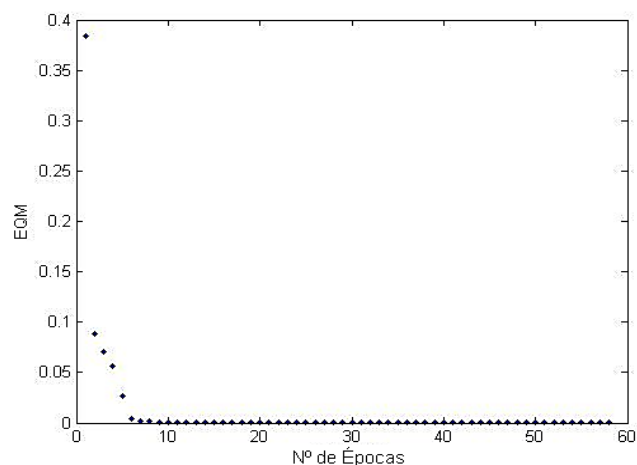


Figura 8: Gráfico de EQM x Épocas para o PMC-2.

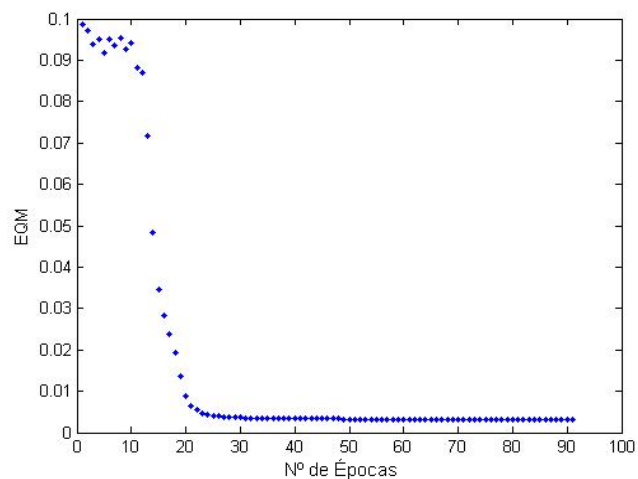


Figura 9: Gráfico de EQM x Épocas para o PMC-3.

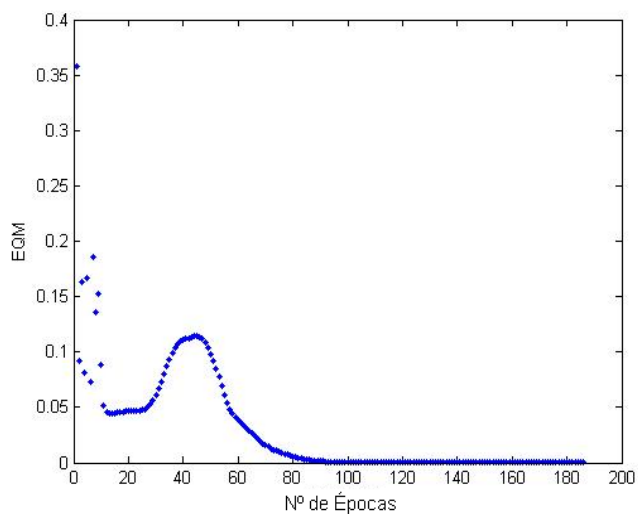


Figura 10: Gráfico de EQM x Épocas para o PMC-4.

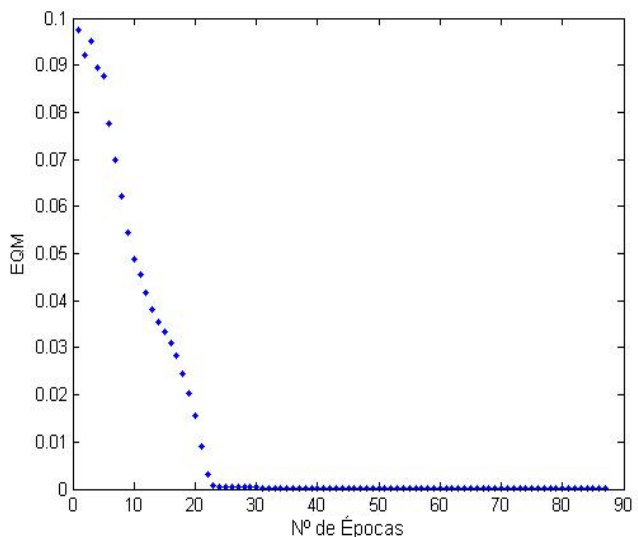


Figura 11: Gráfico de EQM x Épocas para o PMC-5.

Já a Tabela 3 demonstra as saídas (Y) fornecidas pelas redes, já treinadas, após os processos de teste realizados com as 40 amostras selecionadas, os quais tiveram um

aproveitamento de 100% ao acertarem todas as classificações quando comparadas as saídas desejadas do processo de treinamento.

Tabela 3: Saídas das redes para os processos de treinamento para cada PMC e tipo de distúrbio de QEE.

	Y (PMC1)	Y (PMC2)	Y (PMC3)	Y (PMC4)	Y (PMC5)
Afundamento	1	0	0	0	0
Elevação	0	1	0	0	0
Transitório Impulsivo	0	0	1	0	0
Interrupção	0	0	0	1	0
Distorção Harmônica	0	0	0	0	1

Ressalta-se que o processo de treinamento e de testes dos PMCs implementados com as topologias selecionadas demonstraram bons resultados uma vez que convergiram com um número relativamente pequeno de épocas e em um período curto de tempo, não excedendo 203 épocas e 1,3 minutos respectivamente.

Além disso, os gráficos das Figs. 7 a 11 ratificam o desempenho das redes PMC, sendo que a Fig. 10 corrobora o maior número de épocas e tempo para o PMC-4, uma vez que se nota que o EQM varia bastante entre a 20ª e 60ª épocas e apenas estabiliza-se após a 80ª época, enquanto que para os outros PMCs os EQMs variaram menos e estabilizaram-se logo após a 20ª época.

Também se verifica pela análise das Tabelas 1 e 3 que o treinamento foi realizado de forma muito eficiente e que a rede está apta a detectar os distúrbios de qualidade de energia para os quais ela foi desenvolvida, uma vez que obteve 100% de acerto no desenvolvimento dos processos de teste.

V. CONCLUSÕES

No contexto atual em que cada vez mais são exigidos enquadramentos das concessionárias de energia elétrica dentro das normas dos órgãos reguladores do setor elétrico nacional, se fazem necessários estudos como este a fim de determinar e classificar os distúrbios que afetam a QEE, sobretudo em virtude dos avanços tecnológicos que vem contribuindo com a inserção cada vez maior de cargas não-lineares nos sistemas elétricos.

Nesta conjuntura, esta pesquisa veio a contribuir por meio da aplicação de RNAs especialistas baseadas em PMCs para classificação de 5 distúrbios bastante relevantes quando se estudam fenômenos problemáticos para a QEE, demonstrando a eficiência desta técnica de classificação de padrões para engenharia elétrica.

Além disso, os treinamentos e sobretudo os testes ratificaram a eficácia das redes especialistas PMCs, uma vez que a porcentagem de acerto entre os valores desejados de saída e os estimados pela rede foi alta, e também se mostraram rápidas, já que convergiram com no máximo 203 épocas em menos de 1,3 minutos. No entanto, o acerto de 100% esta acima do normal, e pode ser fruto de dados pouco representativos dos distúrbios reais ou exacerbadamente

semelhantes aos dados do conjunto de treinamento. Dessa forma, para pesquisas subsequentes deve-se testar a rede com dados diferentes e até mesmo provenientes de distúrbios em sistemas elétricos distintos. Igualmente, a baixa representatividade dos dados com relação aos distúrbios de QEE, pode ser o causador do reduzido número de épocas de treinamento da rede neural, cujo tempo de treinamento é função da complexidade e da qualidade da base de dados de entrada.

Por fim, ressaltam-se que a partir dos ótimos resultados apresentados neste artigo conclui-se que poderiam ser propostos como pesquisas posteriores a classificação de distúrbios relacionados a variações de tensões de longa duração, transitórios oscilatórios, desequilíbrios de tensão, e inter-harmônicos, aplicando-se as redes especialistas PMCs.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Arrilaga; N. R. Watson; S. Chen. Power System Quality Assessment. 1st Edition. Wiley, 2000.
- [2] A. Kusco; T. Thompson. Power Quality in Electrical Systems. McGraw Hill, 2007.
- [3] R. C. Dugan; M. F. McGranaghan; S. Santoso; H. W. Beaty. Electrical Power Systems Quality, 3rd Edition. McGraw-Hill, 2012.
- [4] M. H. J. Bollen. Understanding power quality problems. Voltage Sags and Interruptions, 1st Edition. New York: Wiley-IEEE Press, 2013.
- [5] ANEEL - Resolução ANEEL nº 024/2000 - Continuidade da distribuição de energia elétrica. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bres2000024.pdf>. Acessado em: 27/03/2016.
- [6] ANEEL - Resolução ANEEL nº 505/2001 Conformidade dos níveis de tensão. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bres2001505.pdf>. Acessado em: 27/03/2016.
- [7] ANEEL - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_7.pdf. Acessado em: 27/03/2016.
- [8] W. F. Usida; M. Oleskovicz; L. C. P. Rodrigues; D. V. Coury. Análise qualitativa no monitoramento automático dos eventos de tensão de curta duração. Controle & Automação (Impresso), v. 20, p. 323-334, 2009.
- [9] P. M. Anderson. Analysis of faulted power systems, IEEE Press, 1995.
- [10] J. Arrilaga and N. R. Watson. Power Systems Harmonics. Wiley, 2003.
- [11] H. Eristi; Y. Demir. Automatic classification of power quality events and disturbances using wavelet transform and support vector machines. IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 6, n. 10, pp. 968 – 976, 2012.
- [12] M. V. Rodriguez; R. J. R. Troncoso; R. A. O. Rios; A. G. Perez. Detection and Classification of Single and Combined Power Quality Disturbances Using Neural Networks. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, n. 5, 2013.
- [13] R. Kumar; B. Singh; D. T. Shahani; A. Chandra; K. Al-Haddad. Recognition of Power-Quality Disturbances Using S-Transform-Based ANN Classifier and Rule-Based Decision Tree. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, n. 2, 2014.
- [14] F. A. S. Borges; R. A. S. Fernandes; I. N. Silva; C. B. S. Silva. Feature Extraction and Power Quality Disturbances Classification Using Smart Meters. IEEE Transactions on Industrial Informatics, v. PP, p. 1-1, 2015.
- [15] S. O. Haykin. Neural networks. A comprehensive foundation, 2 ed. NJ: Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1999.
- [16] S. O. Haykin. Neural Networks and Learning Machines. 3rd Edition, Edition Pearson, 2008.
- [17] I. N. Silva, D. H. Spatti, R. A. Flauzino, “Redes Neurais Artificiais para engenharias e ciências aplicadas”, Artliber Editora, 2010.