

Tomadas de Decisões Fuzzy Através da Inferência de Larsen para o Diagnóstico dos Indicadores de QEE: DTHV, DTHI, FP, VTRP

Diego H. S. Nolasco, Eduardo S. Palmeira

Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia
– PPGMC, UESC/BA, Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas – DCET,
UESC/BA

habibnolasco@gmail.com, espalmeira@uesc.br

Resumo O artigo apresenta um algoritmo de análise para o QEE (Diagnóstico da Qualidade de Energia Elétrica) em baixa tensão considerando como parâmetros para a avaliação os indicadores: Distorção Harmônica Total de Tensão (DTHV), Distorção Harmônica Total de Corrente (DTHI), Fator de Potência (FP), Variação de Tensão em Regime Permanente (VTRP). O método de tomada de decisão adotado faz uso de associações em modelo cascata de controladores fuzzy e considera a inferência de Larsen como modelo matemático para tomada de decisão.

Palavras-chave Diagnóstico, Teoria Fuzzy, Modelagem Computacional, Diagnóstico de Qualidade de Energia Elétrica, Inferência de Larsen.

1 Introdução

Diversos são os termos encontrados para Qualidade de Energia Elétrica (QEE), já que: concessionárias, consumidores e fabricantes de equipamentos, definem a QEE de formas distintas. Do ponto de vista da concessionária, a qualidade de energia elétrica pode ser definida pela ausência de desligamentos, flutuações de tensão, transitórios e harmônicos, medidos no ponto de entrega de energia. Do ponto de vista do consumidor, a QEE pode ser definida como sendo a ausência de formas de perturbação manifestadas na energia consumida, ou seja, na tensão, corrente ou frequência que resultem em falhas ou má operação de seus equipamentos. Já do ponto de vista acadêmico, qualidade de energia elétrica é a disponibilidade da energia elétrica, com forma de onda senoidal e pura, sem alterações na amplitude, emanando de uma fonte de potência infinita.

Na última década a conscientização de que a energia elétrica é um produto e como tal deve ser fornecido dentro de padrões mínimos de qualidade ficou cada vez mais evidente. Principalmente após a introdução dos dispositivos eletrônicos baseados nos semicondutores que surgiram a partir das últimas duas décadas tais como: retificadores, inversores, fontes chaveadas, dentre diversos outros equipamentos de uso residencial, comercial e industrial. Assim, o fornecimento de energia elétrica com qualidade ruim acarreta em: perda de eficiência, maior custo de manutenção da rede elétrica e dos equipamentos interligado, maior ocorrência

de desligamento, diminuição da vida útil das instalações elétricas: fios e cabos, conexões, dispositivos de proteção e equipamentos, diminuição de competitividade.

Existem atualmente no mundo diversas regulamentações e normas que objetivam estabelecer padrões para manter a qualidade da energia elétrica com relação ao seu fornecimento por parte das concessionárias. Sendo que a maioria dos requisitos para a qualidade da energia elétrica adotados em regulamentações de diferentes países se fundamentam, nas diretrizes traçadas pela IEC (*International Electrotechnical Commission*), IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*) [8]. Com a necessidade de regulamentar o produto energia elétrica no Brasil, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) aprovou em dezembro de 2008 a primeira versão de um conjunto de documentos para tratar do tema: PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional).

O PRODIST constitui um conjunto de diretrizes e procedimentos para o segmento de distribuição de energia elétrica no Brasil, descritas em oito módulos. Desta forma os oito módulos do PRODIST são regulatórios que padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição. O Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica do PRODIST, define os seguintes aspectos a serem considerados com relação a qualidade do produto em regime permanente ou transitório são: Tensão em Regime Permanente; Fator de Potência; Harmônicos; Desequilíbrio de Tensão; Flutuação de Tensão; Variações de Tensão de Curta Duração; Variação de Frequência [9].

Neste contexto, o diagnóstico torna possível o reconhecimento de perturbações que afetam a QEE de forma mais rápida, permitindo que ações preventivas sejam tomadas, evitando ou minimizando danos aos diversos equipamentos elétricos e eletroeletrônicos, e aumentando a vida útil das instalações elétricas.

2 Algoritmo Proposto

O algoritmo apresentado na Figura 1 é composto por três etapas, ou seja, é dividido em três módulos associados em cascata, que juntos fazem o diagnóstico da qualidade de energia elétrica para os indicadores: DTHV, DTHI, FP, e VTRP, respectivamente [1,10]. Os módulos são baseados na teoria dos controladores fuzzy, fazendo uso dos seguintes termos linguísticos: extremamente crítico, crítico, precário e adequado. Cada controlador fornece um diagnóstico clássico para o usuário e outro diagnóstico fuzzy para o controlador fuzzy subsequente, de forma a minimizar a perda de dados que normalmente ocorre nos processos de defuzzificação e fuzzificação utilizados na associação de controladores.

3 Sistema de Diagnóstico

As arquiteturas dos controladores fuzzy, foram desenvolvidas em cinco etapas, são elas: Aquisição de Dados, (MF) Módulos de Fuzzificação, (MTD) Módulos

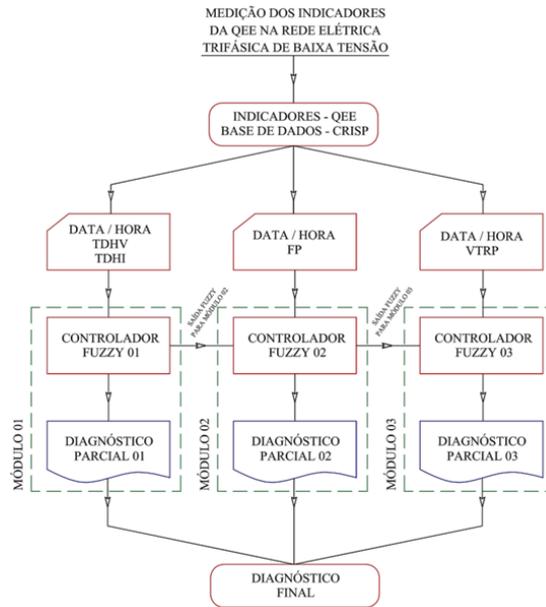


Figura 1. Amostras de quinze leituras.

de Tomada de Decisão, (MD) Módulos de Defuzzificação, arquivamento e interpretação dos resultados obtidos, [2,3]. Os termos linguísticos utilizados no modelo proposto tem como base os termos adotados no Módulo 8 do PRODIST: Crítico, Precário, Adequado, onde ainda podem ser observadas sub-termos: Extremamente Crítico, Extremamente Adequado.

Aquisição de dados: a base de dados é composta pelos indicadores: DTHI, DTHV, FP, e VTRP, que foram coletados no ponto de acoplamento comum PCC (*Point of Common Coupling*), situado entre as fontes e as cargas elétricas. Para coleta dos dados foi utilizado o equipamento: Analisador de Qualidade de Energia Modelo EMBRASUL RE6081/B/H N.S: 98200532 que estava devidamente calibrado. O indicadores foram coletados em um sistema trifásico de baixa tensão de uma indústria do ramo alimentício localizada no município de Santo Antônio de Jesus - BA, e ocorreu durante um período de 24 horas entre os dias 19-03-15 e 28-03-15. A Figura 2 apresenta a fração de 15 segundos de leituras retiradas da base de dados descrita anteriormente. **Módulo de fuzzificação:** fuzzifica os indicadores (DTHI, DTHV, FP, e VTRP), tendo que as funções de pertinências de cada módulo foram desenvolvidas com base nas diferenças entre os valores de referências ou limites máximos considerados como aceitáveis para cada indicador. Isso para tensões abaixo de 1kV, conforme apresentados na Tabela 1 que retem a [6,7,8,9,11,12].

Módulo de tomada de decisão: As bases de regras utilizadas no sistema de diagnóstico da QEE são compostas por um total de 16 regras para dois primeiros

controladores, e 20 regras para o terceiro controlador. Observar que para as bases de regras antecedentes de cada controlador são os estados linguísticos fuzzy e os consequentes são as respostas linguísticas fuzzy dos diagnósticos parciais 01, 02, e 03 aqui denominadas de QEE_DP01, QEE_DP02, QEE_DP03, respectivamente e são representadas através as Tabelas 2, 3, e 4. O algoritmo apresentado utiliza a inferência Larsen que faz uso da t-norma do produto e da sua t-conorma N-dual [3,4,5]. **Módulo de defuzzificação:** a defuzzificação do sistema é feita através do método centro de gravidade, onde a resposta obtida é fornecida em valor percentual, ou seja, o diagnóstico final será um número clássico, variando de 0% até 100%, conforme indicado na Tabela 1. Além das respostas em porcentagem, o sistema fornece estados condicionais a resposta: Extremamente Crítico, Crítico, Precário e Adequado.

DATA	HORA	DHTua	DHTub	DHTuc	DHTia	DHTib	DHTic	FFa	FFb	FFc	Uab	Ubc	Uca
19032015	163433	1.740	1.720	1.520	11.450	32.880	0.000	0.934	0.851	0.917	401.001	403.038	402.917
19032015	163434	1.720	1.720	1.510	9.110	32.950	0.000	0.940	0.875	0.936	400.958	403.012	402.882
19032015	163435	1.720	1.710	1.510	7.870	32.630	0.000	0.932	0.843	0.909	400.932	403.012	402.874
19032015	163436	1.720	1.720	1.530	7.310	33.270	0.000	0.933	0.840	0.908	400.794	402.899	402.744
19032015	163437	1.750	1.720	1.530	10.780	32.760	0.000	0.951	0.875	0.936	400.889	402.960	402.848
19032015	163438	1.780	1.720	1.530	11.160	32.730	0.000	0.944	0.854	0.919	400.863	402.960	402.805
19032015	163439	1.740	1.730	1.530	8.450	33.570	0.000	0.924	0.831	0.908	400.854	402.951	402.822
19032015	163440	1.740	1.730	1.530	10.040	38.000	0.000	0.963	0.870	0.949	400.768	402.900	402.770
19032015	163441	1.750	1.730	1.520	11.010	38.560	0.000	0.956	0.857	0.938	400.820	402.908	402.796
19032015	163442	1.800	1.730	1.530	14.240	39.050	0.000	0.938	0.831	0.917	400.958	403.029	402.917
19032015	163443	1.780	1.730	1.540	12.000	38.760	0.000	0.953	0.867	0.948	400.993	403.029	402.917
19032015	163444	1.730	1.720	1.530	8.560	37.660	0.000	0.962	0.857	0.948	400.932	402.977	402.856
19032015	163445	1.720	1.730	1.520	7.840	39.260	0.000	0.947	0.819	0.927	400.915	402.960	402.804
19032015	163446	1.730	1.730	1.520	11.640	39.020	0.000	0.951	0.867	0.947	400.941	402.925	402.778
19032015	163447	1.750	1.720	1.520	12.520	37.850	0.000	0.952	0.857	0.938	400.897	402.951	402.761

Figura 2. Amostras de quinze leituras.

O algoritmo foi modelado em código script, através do software Matlab – Versão R2013a. O computador utilizado para execução das rotinas possui as seguintes configurações: Processador AMD C-60 APU with RadeonTM HD Graphics 1.00 Hz, Memória RAM instalada de 4GB (com 2,62GB de memória utilizável) e Sistema Operacional de 32bits. Os resultados obtidos a partir da análise da fração de 15 leituras retirada da base de dados real são apresentados pelas Figuras 3, 4, e 5.

4 Discussão do Resultados

Analisando os resultados obtidos considerando os dados de entrada apresentados na Figura 2, para os indicadores DTHV e DTHI que foram fornecidos pelo controlador 01, tem-se que: a fase A apresentou diagnóstico precário com valor percentual na faixa dos 77%, já a fase B apresentou diagnóstico crítico na faixa dos 62%, e a fase C apresentou diagnóstico adequado com valores acima de 91%. Comparando os resultados apresentados com os valores de entrada da base de dados apresentada pela Figura 2, percebe-se que os mesmos são coerentes e atendem ao objetivo proposto. Os resultados obtidos a partir da inserção do indicador FP no sistema de diagnóstico podem ser observados a partir do controlador 02,

Tabela 1. Critérios adotados no desenvolvimento das funções de pertinências de fuzzificação dos indicadores: DTHI, DTHV, FP, e VTRP.

Intervalos - Fuzzificador para DTHV	
Critérios	Diferença - Normas
$0\% \leq \text{Extremamente Adequado} \leq 3\%$ $2,5\% \leq \text{Adequado} \leq 6,5\%$ $5\% \leq \text{Precário} \leq 8\%$ $\text{Crítico} \geq 7,5\%$	IEC 61000-2-2 IEC 61000-2-4 IEEE 519 Mod. 8 do PRODIST Oliveira et al, 2014
Intervalos - Fuzzificador para DTHI	
Critérios	Diferença - Normas
$0\% \leq \text{Adequado} \leq 6\%$ $5\% \leq \text{Precário} \leq 25\%$ $20\% \leq \text{Crítico} \leq 50\%$ $\text{Extremamente Crítico} \geq 45\%$	IEC 61000-3-6 IEEE519
Intervalos - Fuzzificador Fator de Potência	
Critérios	Diferença - Normas
$0 \leq \text{Extremamente Crítico} \leq 0,75$ $0,7 \leq \text{Crítico} \leq 0,85$ $0,8 \leq \text{Precário} \leq 0,95$ $\text{Adequado} \geq 0,92$	Mod. 8 do PRODIST Oliveira et al,2014 Resolução 414 Aneel
Intervalos - Fuzzificador para VTRP	
Critérios	Diferença - Normas
$0V \leq \text{Crítico Inferior} \leq 327V$ $323V \leq \text{Precário Inferior} \leq 361V$ $342V \leq \text{Adequado} \leq 399V$ $396V \leq \text{Precário Superior} \leq 437V$ $\text{Crítico Superior} \geq 418V$	Mod. 8 do PRODIST Oliveira et al, 2014 Resolução 505 Aneel
Intervalos - Defuzzificador dos Controladores	
Critérios - Diagnóstico da QEE	$0\% \leq \text{Extremamente Crítico} \leq 55\%$ $50\% \leq \text{Crítico} \leq 75\%$ $70\% \leq \text{Precário} \leq 85\%$ $80\% \leq \text{Adequado} \geq 100\%$

onde: a fase A mantém o diagnóstico precário na faixa dos 77%, a fase B indicou em alguns momentos um redução brusca da QEE apresentado valores extremamente críticos na faixa dos 30%, e a fase C também apresentou redução da QEE indicando valores variando entre adequado e precário na faixa dos 77% aos 88%. É importante observar que os resultados apresentados na saída do controlador 02, carregam as informações que saem do controlador 01, e por isso a fase B do sistema apresentou resultados extremamente críticos com valores na faixa dos 30%. Observando os resultados obtidos a partir da inserção do indicador VTRP no algoritmo, a saída do controlador 03 não apresentou alterações consideráveis para as fase A, B, e C, isso se comparadas com os resultados apresentados pelo controlador 02. Tal fato indica que os resultados obtidos a partir dos indicadores para VTRP apresentados na Figura 2, estão dentro dos limites aceitáveis.

Tabela 2. Base de regras do controlador 01.

Se	DTHV	e	DTHI	Então QEE_DP01
R1	Ext. Adequado		Adequado	Adequado
R2	Ext. Adequado		Precário	Precário
R3	Ext. Adequado		Crítico	Crítico
R4	Ext. Adequado		Ext. Crítico	Ext. Crítico
R5	Adequado		Adequado	Adequado
R6	Adequado		Precário	Precário
R7	Adequado		Crítico	Crítico
R8	Adequado		Ext. Crítico	Ext. Crítico
R9	Precário		Adequado	Precário
R10	Precário		Precário	Precário
R11	Precário		Crítico	Crítico
R12	Precário		Ext. Crítico	Ext. Crítico
R13	Crítico		Adequado	Crítico
R14	Crítico		Precário	Crítico
R15	Crítico		Crítico	Ext. Crítico
R16	Crítico		Ext. Crítico	Ext. Crítico

Tabela 3. Base de regras do controlador 02.

Se	QEE_DP01 e	FP	Então QEE_DP02
R1	Adequado	Adequado	Adequado
R2	Adequado	Precário	Precário
R3	Adequado	Crítico	Crítico
R4	Adequado	Ext. Crítico	Ext. Crítico
R5	Precário	Adequado	Precário
R6	Precário	Precário	Precário
R7	Precário	Crítico	Crítico
R8	Precário	Ext. Crítico	Ext. Crítico
R9	Crítico	Adequado	Crítico
R10	Crítico	Precário	Crítico
R11	Crítico	Crítico	Ext. Crítico
R12	Crítico	Ext. Crítico	Ext. Crítico
R13	Ext. Crítico	Adequado	Ext. Crítico
R14	Ext. Crítico	Precário	Ext. Crítico
R15	Ext. Crítico	Crítico	Ext. Crítico
R16	Ext. Crítico	Ext. Crítico	Ext. Crítico

5 Conclusão

O algoritmo desenvolvido apresentou resultados coerentes, sendo que as próximas etapas da pesquisa serão inserir novos módulos possibilitando a análise de outros indicadores, tais como: fator de desequilíbrio, e variação de frequência. E implementar métodos numéricos que realizem a interpolação dos resultados obtidos a cada segundo para períodos de 15 minutos, o que facilitará a interpretação dos

Tabela 4. Base de regras do controlador 03.

Se	QEE_DP02 e	VTRP	Então QEE_DP03
R1	Adequado	Crítico Inf.	Crítico
R2	Adequado	Crítico Sup.	Crítico
R3	Adequado	Precário Inf.	Precário
R4	Adequado	Precário Sup.	Precário
R5	Adequado	Adequado	Adequado
R6	Precário	Crítico Inf.	Crítico
R7	Precário	Crítico Sup.	Crítico
R8	Precário	Precário Inf.	Precário
R9	Precário	Precário Sup.	Precário
R10	Precário	Adequado	Precário
R11	Crítico	Crítico Inf.	Ext. Crítico
R12	Crítico	Crítico Sup.	Ext. Crítico
R13	Crítico	Precário Inf.	Crítico
R14	Crítico	Precário Sup.	Crítico
R15	Crítico	Adequado	Crítico
R16	Ext. Crítico	Crítico Inf.	Ext. Crítico
R17	Ext. Crítico	Crítico Sup.	Ext. Crítico
R18	Ext. Crítico	Precário Inf.	Ext. Crítico
R19	Ext. Crítico	Precário Sup.	Ext. Crítico
R20	Ext. Crítico	Adequado	Ext. Crítico

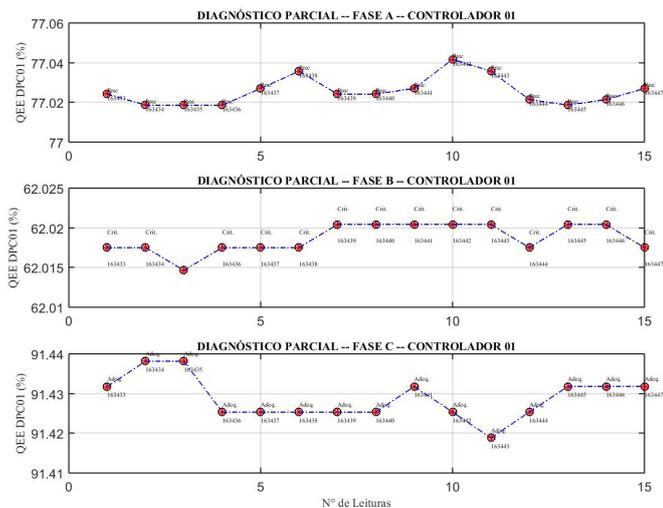


Figura 3. Gráfico do diagnóstico da parcial QEE do controlador 01 - QEE_DP01.

diagnósticos em períodos longos de tempo, e permitirá que sejam considerados pelo método o tempo de duração dos distúrbios.

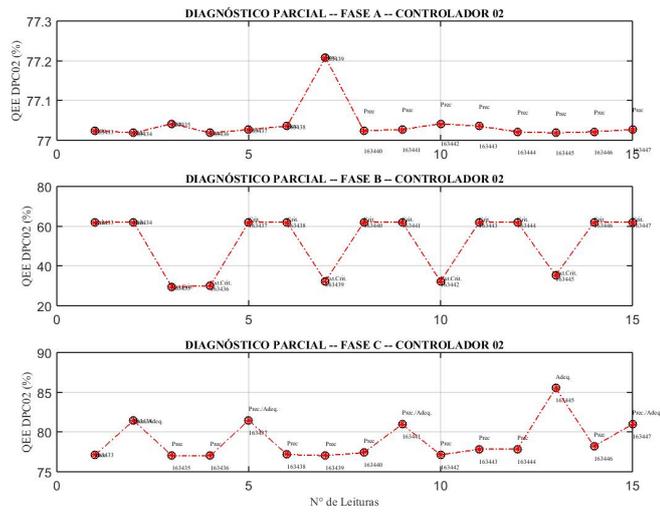


Figura 4. Gráfico do diagnóstico da parcial QEE do controlador 02 - QEE_DP02.

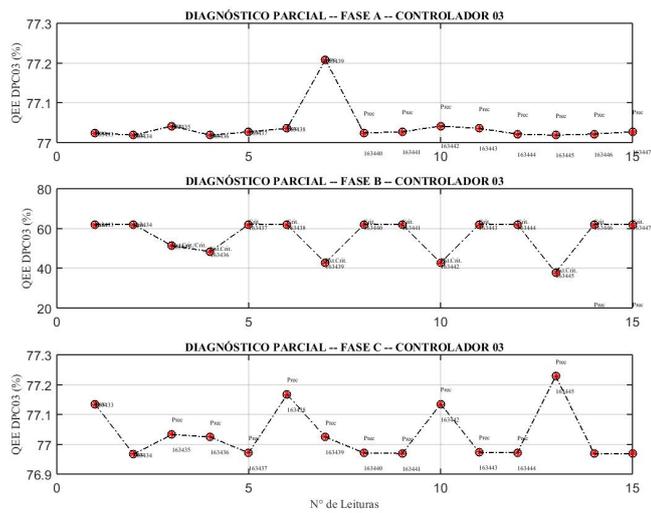


Figura 5. Gráfico do diagnóstico da parcial QEE do controlador 03 - QEE_DP03.

Referências

1. A. Kusko and M.T. Thompson. Power Quality in Electrical Systems. Mc Graw Hill, U.S.A, 2007.

2. L. B. R. Bassanezi. Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática. Campinas, S.P.: Unicamp, 2006.
3. D. Chaturvedi. Soft Computing - Techniques and its Applications in Electrical Engineering. Angra, India: Deemed University, 2008.
4. E.P. Klement and R. Mesiar and E. Pad. Triangular Norms. Poland, 2000.
5. E.S. Palmeira. Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN. Programa de Pós Graduação em Informática e Matemática Aplicada, 2013.
6. IEC61000. Electromagnetic Compatibility IEC61000 Series. International Electro-technical Commission, 1990-2006.
7. IEEE1159. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009.
8. J.C. Oliveira and A.J.P. Junior and A.C. Delaiba. Relatório Técnico - Definições de Padrões de Referência: Distorções Harmônicas, Desequilíbrios de Tensão, Flutuações de Tensão e Variação de Tensão de Curta Duração. Universidade Federal de Uberlândia, 2014.
9. Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012.
10. A. P. R. L. E. T. D. Zaninelli. Analysis of Harmonic Distortion Limits In IEC And IEEE Standards. Electrical Power Quality and Utilisation, volume V, 1999. 2 edition.
11. Resolução Normativa n 414. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2010.
12. Resolução Normativa n 505. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2001.