

Aplicativo Computacional para Simulação e Análise dos Parâmetros Referentes à Qualidade da Energia Elétrica

Arthur Costa de Souza, Carlos Eduardo Tavares, Isaque Nogueira Gondim
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia/MG, Brasil
E-mail: arthur_costasouza@hotmail.com, cetavares@eel.ufu.br, gondim.isaque@gmail.com.

Resumo - Este artigo destaca a apresentação do aplicativo computacional PQA (Power Quality Analyzer) e suas respectivas ferramentas de trabalho, o qual se destaca como uma grande contribuição na área de qualidade de energia elétrica, devido ao software apresentar um medidor virtual de qualidade da energia elétrica. Este aplicativo permite a análise e simulação de vários componentes e cargas tipicamente encontrados nas redes elétricas de distribuição. Além disso, o software possibilita a inserção de distúrbios associados à qualidade da energia elétrica.

Palavras-chaves - Aplicativo computacional, ATP, Modelagem computacional, qualidade da energia elétrica.

SOFTWARE FOR COMPUTATIONAL SIMULATION AND ANALYSIS OF PARAMETERS RELATING TO THE POWER QUALITY

Abstract - This paper highlights the presentation of the software PQA (Power Quality Analyzer) and their working tools, which stands as a major contribution in the area of power quality due to its virtual power quality meter. This application enables the simulation and the analysis of various components and loads typically found in electrical distribution networks. In addition, the software enables the insertion of disturbances associated with the power quality.

Keywords - ATP, Computer application, Modeling, power quality.

I. INTRODUÇÃO

A definição de qualidade de energia elétrica está associada a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. Uma boa definição para o problema de qualidade de energia é: “Qualquer problema da energia manifestada na tensão, na corrente ou nas variações de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos dos consumidores” [1]. Estas alterações ocorridas na tensão e corrente podem ocorrer em várias partes do sistema elétrico, seja nas instalações dos consumidores, seja no sistema supridor da concessionária [2]. Tanto a concessionária de energia elétrica e os consumidores estão se tornando cada vez mais preocupados com a qualidade da energia elétrica [3]. A qualidade da energia tornou-se um dos chavões mais

prolíficos no setor de energia. É um conceito primordial para uma infinidade de tipos de perturbações que ocorre em um sistema elétrico. As principais razões para o aumento da preocupação são: Instalação cada vez maior de cargas não lineares, pois há um crescente uso de equipamentos que, em muitos casos, aumentam os níveis de distorções harmônicas e podem levar o sistema a condições de ressonância e maior sensibilidade dos equipamentos instalados aos efeitos dos fenômenos (distúrbios) de qualidade de energia elétrica [2].

Com a evolução tecnológica, os equipamentos estão ficando cada vez mais eficientes e produtivos. Contudo, o tais equipamentos, muitas das vezes, é o que mais sofre com as perturbações advindas da rede elétrica e, curiosamente, pode também ser a fonte dos problemas de qualidade de energia. Quando os processos inteiros são automatizados, o funcionamento eficiente das máquinas e seus controles tornam-se cada vez mais dependente de energia de qualidade. Em resposta a esta crescente preocupação com a qualidade da energia, concessionárias de energia elétrica têm programas que os ajudam a responder às preocupações dos clientes. A filosofia desses programas varia de reativa, onde o utilitário responde às reclamações dos clientes, a proativa, onde o utilitário está envolvido em educar o cliente e promover serviços que podem ajudar a desenvolver soluções para os problemas de qualidade de energia. Os assuntos regulatórios enfrentados podem desempenhar um papel importante na forma como os seus programas são estruturados. Uma vez que os problemas de qualidade de energia, muitas vezes envolvem interações entre o sistema de abastecimento e as instalações e equipamento do cliente, os reguladores devem certificar-se de que as empresas de distribuição têm incentivos para trabalhar com os clientes e ajudar os clientes a resolver estes problemas [4].

No Brasil, o fornecimento de energia elétrica é conduzido por regulamentações formalizadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que compreendem a qualidade do produto e a qualidade de serviço. O primeiro é caracterizado pela forma de onda de tensão provida. Enquanto a segunda é basicamente entendido como quanto à concessionária é capaz de minimizar as interrupções na rede elétrica, sejam elas por curtos-circuitos ou por manutenções programadas. Com o intuito de minimizar os problemas e manter os padrões associados à qualidade de energia elétrica em níveis seguros e admissíveis, as concessionárias de energia elétrica têm seguido as recomendações dos agentes reguladores, que definem valores máximos para alguns itens de qualidade. Estes estão definidos nas recomendações do PRODIST - Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional, em seu módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica [5].

Apesar dos esforços das concessionárias na disponibilização de uma energia elétrica dentro dos limites



XII CEEL – ISSN 2178-8308
13 a 17 de Outubro de 2014
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

estabelecidos pelo PRODIST, deve-se ressaltar que a inserção contínua e aleatória de grandes cargas perturbadoras, algumas vezes igualmente sensíveis, acaba comprometendo a qualidade da mesma, podendo influenciar no funcionamento de máquinas e equipamentos, além de aumentar as perdas elétricas e o carregamento dos cabos e dispositivos da rede elétrica, dentre outros problemas. Além disso, a falta de informações sobre estas cargas especiais e a ausência de programas computacionais para simulação dos impactos da conexão das mesmas nos sistemas de distribuição, acabam dificultando ações mitigadoras prévias por parte das distribuidoras de energia.

Diante deste cenário, este artigo tem como finalidade apresentar um software que permite simular todos os eventos possíveis de ocorrência em uma rede elétrica. A sua interface gráfica apresenta o analisador de energia elétrica, mais conhecido como qualímetro que, além de possuir medidores de tensão e corrente, apresenta resultados de fator de potência, desequilíbrio, espectro harmônico de tensão, espectro harmônico de corrente, Flicker, VTCDs, dentre outros. Este software também é capaz de simular, através de modelos elétricos equivalentes de cargas perturbadoras, os possíveis impactos da conexão destas cargas na rede elétrica da concessionária, permitindo analisar, de forma preventiva, a necessidade e a viabilidade de ações mitigadoras.

II. O APLICATIVO COMPUTACIONAL PQA

O aplicativo computacional denominado por PQA (Power Quality Analyzer) foi concebido de forma a proporcionar simulações no domínio do tempo, através do aplicativo ATP (Alternative Transients Program), para facilitar a avaliação técnica dos impactos da inserção e retirada de cargas perturbadoras da rede elétrica, e também, os impactos da propagação de distúrbios elétricos nas redes de distribuição da concessionária. A interface gráfica do PQA ilustrada na Figura 1, foi desenvolvida em linguagem C# sendo esta composta por uma área para edição e montagem do circuito elétrico da rede de distribuição. Nela, todos os comandos e campos são dispostos de forma direta e prática onde o usuário visualiza facilmente os instrumentos ou opções de trabalho e, através do clique do mouse nos componentes da barra de ferramentas e, posterior clique na área de desenho, efetua-se a montagem do sistema. Existe também a opção de importação da rede elétrica pelo sistema de dados dos softwares georeferenciados.

O acesso aos dados e a consequente edição de cada componente do diagrama unifilar sob análise, podem ser realizados através de um duplo clique com o botão esquerdo do mouse no componente desejado. Adicionalmente, cada elemento de desenho, assim como sua descrição, pode ter sua cor e tamanho da fonte alterados através de um menu suspenso, acessado pelo botão direito do mouse.

Após a montagem e edição dos dados do sistema com suas respectivas informações, o mesmo poderá ser salvo em disco de forma a permitir avaliações futuras.

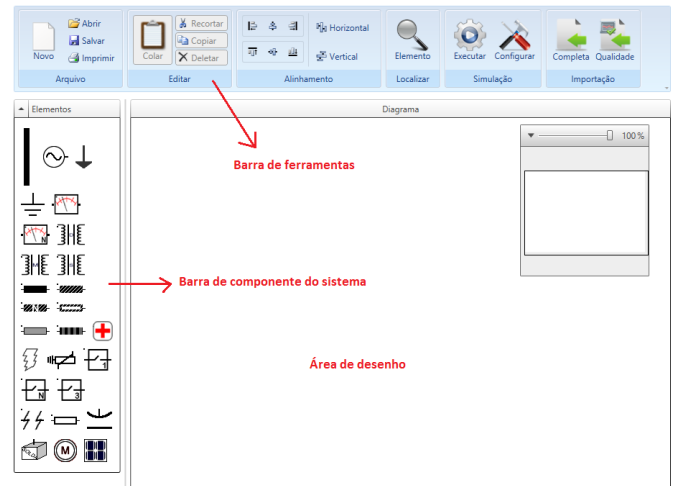


Fig. 1. Interface gráfica do PQA

III. MÓDULO PARA CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA E MÓDULO DE EDIÇÃO

No módulo de configuração do sistema são disponibilizados componentes como: fonte de tensão, transformadores, banco de capacitores, dispositivos de manobra e proteção (disjuntor, chave-fusível e para-raios), cargas P e Q, cabos condutores de energia, distúrbios, medidor de qualidade da energia elétrica e o consumidor. Já o módulo de edição permite a caracterização dos principais parâmetros dos dispositivos e fenômenos elétricos constituintes do sistema elétrico definido no módulo de configuração.

Para facilitar a montagem do sistema, cada componente solicita os dados essenciais dos equipamentos selecionados, sendo as demais propriedades calculadas internamente através de equações clássicas, sem a intervenção do usuário. Este é, por exemplo, o caso das características não lineares de transformadores e para-raios. Outra opção, ainda mais facilitadora, consiste na disponibilização de um banco de dados pré-definido para alguns componentes. Além de permitir a análise e o impacto causado pela conexão de cargas perturbadoras na rede de distribuição, outra potencialidade do programa, consiste na avaliação dos impactos causados pela propagação de distúrbios da qualidade da energia elétrica ao longo da rede de distribuição. Isso permite a concessionária nortear seus planos de expansão e melhorias de rede através de informações reais do sistema, e ainda, estabelecer os possíveis causadores de desligamentos da rede.

IV. ESTUDO DE CASO UTILIZANDO O PQA

Para fins de ilustração da potencialidade e do processo de aplicação da metodologia e do software, a Figura 2 mostra a modelagem de uma rede de distribuição correspondente ao ramal de alimentação ao qual foi inserido um Motor de Indução Trifásico (MIT). O caso sob consideração corresponde a um estudo hipotético da conexão, analisando o impacto que esta carga possa sofrer de alguns distúrbios aplicados.

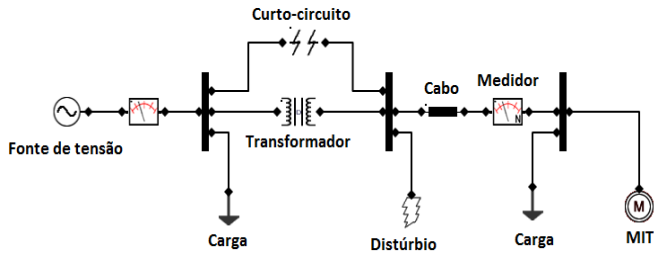


Fig. 2. Rede de distribuição a ser analisado.

Todos os oscilogramas que serão apresentados a seguir são medições provenientes dos medidores de qualidade da energia elétrica inseridos na saída da fonte de tensão e no barramento do motor. Todos os dispositivos e elementos que compõem a rede foram modelados no *software* ATP (Alternative Transients Program) e inseridas no PQA (Power Quality Analyser), visando considerar suas características forma mais próxima da realidade.

A Figura 3 apresenta a interface da fonte de tensão e seus respectivos distúrbios, os quais o usuário terá a capacidade de simular situações em que a energia disponibilizada pela fonte não esteja dentro dos padrões adequados e nominais. Os distúrbios que podem ser simulados neste componente são referentes aos VTCDs, flutuações de tensão, distorções harmônicas e desequilíbrios. Estes podem ser aplicados e o programa se incumba de propagar o distúrbio até o ponto de localização do equipamento sob análise.

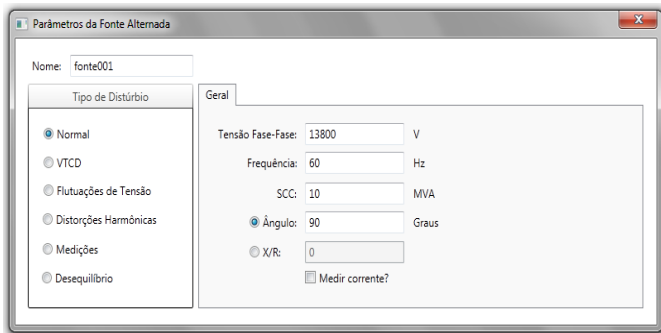


Fig. 3. Sistema a ser analisado.

Por motivos de espaço, os distúrbios a serem discutidos neste artigo são a descarga atmosférica, o curto-circuito e as distorções harmônicas.

A. Descarga atmosférica

A Figura 4 apresenta a interface do componente "Distúrbios" na opção de descarga atmosférica. A caracterização das ondas de tensão e corrente incidentes sobre as redes podem ser aplicadas em qualquer ponto da rede e serem propagadas até o ponto de interesse. Os fenômenos associados a este distúrbio e suas implicações em consumidores finais são contemplados em documentos como: IEEE C6241, IEEE C6234, IEEE C6245, IEC 61643-1, IEC 61000-4-5. Estes estabelecem um padrão de onda clássico de 1,2 μ s para o tempo de subida e 50 μ s para se atingir 50% do valor de crista da tensão e de 8 μ s para o tempo de subida e 20 μ s para se atingir 50% do valor de crista da corrente. Esses fenômenos buscam a representação da incidência de descargas atmosféricas em um sistema elétrico.

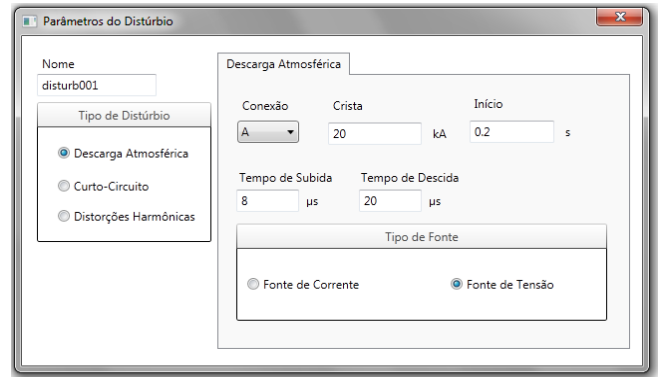


Fig. 4. Módulo de configuração da descarga atmosférica.

As Figuras 5.a e 5.b mostram os oscilogramas das tensões resultantes no barramento de baixa tensão devido à descarga atmosférica. Como seria esperado e, em função da configuração da rede do sistema as tensões de fase sofrem elevações anormais. Como visto em [7] e [8].

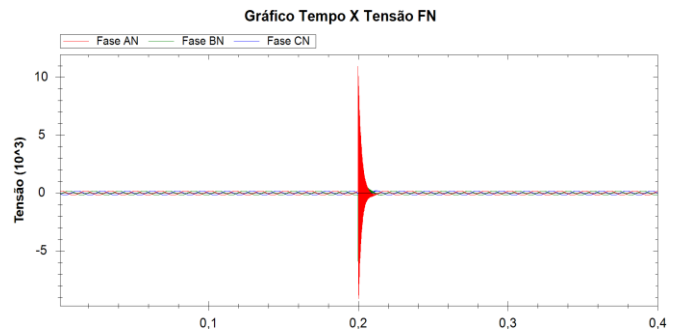


Fig. 5. a. Tensão no barramento sobre influência de uma descarga atmosférica.

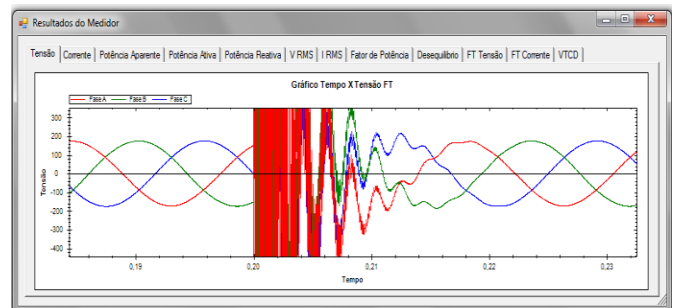


Fig. 5. b. Zoom da tensão no barramento no momento da descarga atmosférica.

Na seqüência procedem-se os oscilogramas das correntes resultantes no barramento de baixa tensão devido ao distúrbio ocorrido, como pode ser visto na Figura 6. Como deveria ser, as correntes de fase apresentam valores acima das nominais e desequilibradas entre si [9].

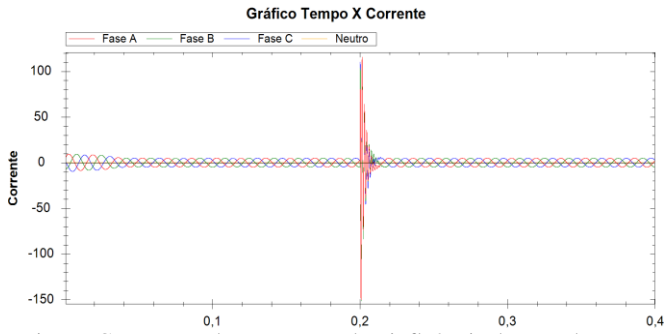


Fig. 6. Corrente no barramento sobre influência de uma descarga atmosférica

Embora não seja um resultado válido para esta situação, para fins de demonstração da potencialidade do aplicativo PQA, a Figura 7 demonstra o fator de potência de cada fase do motor de indução trifásico, em que no momento da descarga atmosférica, ocorre uma redução brusca do fator de potência, isso é devido o ângulo da corrente durante o distúrbio aumentar consideravelmente, pois o fator de potência consiste no cosseno da diferença do ângulo entre tensão e corrente.

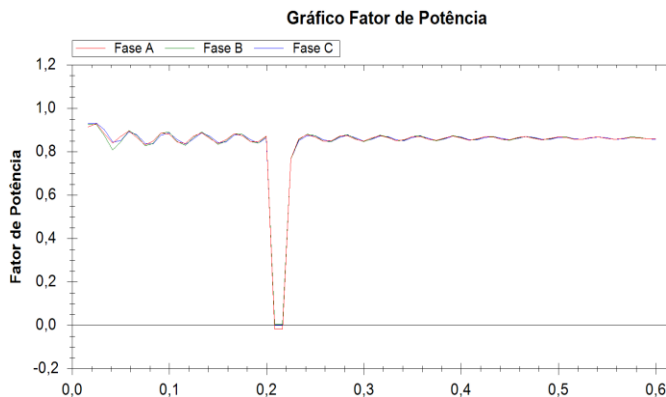


Fig. 7. Fator de potência no barramento sobre influência de uma descarga atmosférica.

Para o caso do desequilíbrio, a influência do distúrbio em foco não deve ser considerada, sendo considerada uma amostra inválida. Não obstante, para ilustrar a potencialidade do aplicativo PQA, a Figura 8 exibe o desequilíbrio, a qual a faixa verde indica que o desequilíbrio está dentro dos limites estabelecidos (2%) enquanto que a outra faixa (vermelha) mostra a região em que o limite recomendado foi violado.

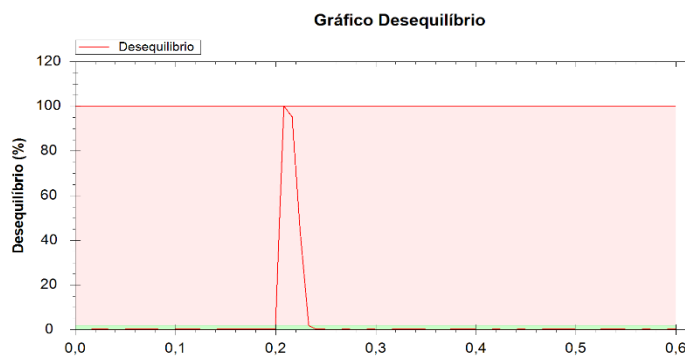


Fig. 8. Desequilíbrio no barramento do lado de baixa tensão.

B. Curto-circuito

A Figura 9 expõe a interface do distúrbio na opção de curto-circuito.

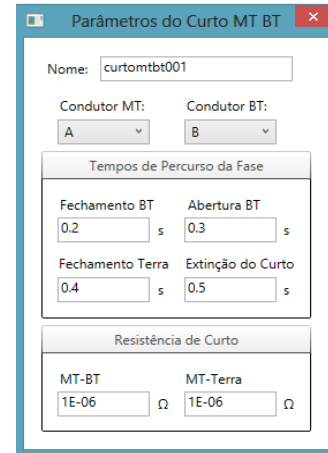


Fig. 9. Interface do curto-circuito.

Para este fenômeno foi simulada a situação de um curto-circuito de um condutor da média tensão com um de baixa tensão e posterior queda no solo. Como possibilidade de ocorrência, em função da configuração da rede de distribuição e seus parâmetros, a fase A do lado de média tensão (13800V) rompe e fecha um curto-circuito ao tocar o condutor da fase B de baixa tensão, provocando então um súbito afundamento no instante (0,2s a 0,3s) da simulação. O mesmo efeito ocorre também no instante em que os condutores atingem o solo (0,4s a 0,5s). Como era esperado, percebe-se um súbito crescimento da corrente e afundamento das tensões. A situação em pauta fica evidenciada na Figura 10.b.

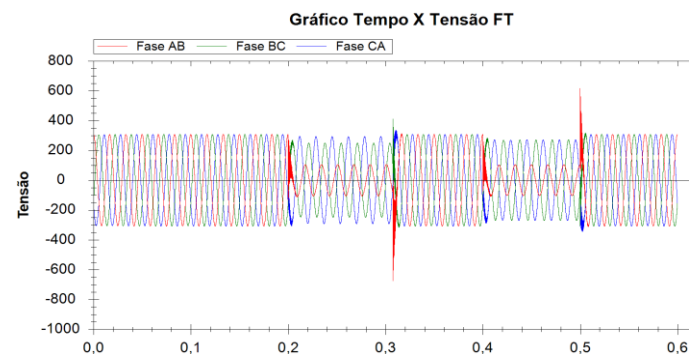


Fig. 10.a Formas de ondas das tensões no barramento onde ocorreu o curto-circuito.

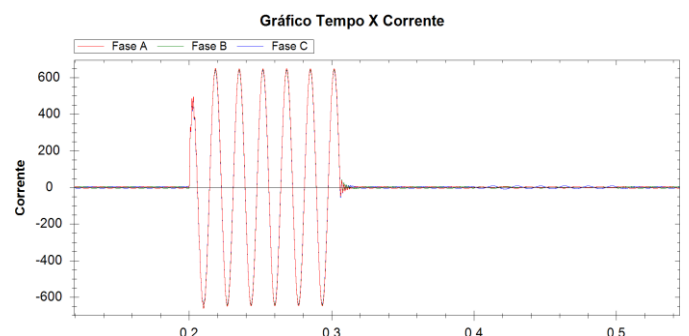


Fig. 10.b Formas de ondas das correntes no barramento onde ocorreu o curto-circuito.

A Figura 11 mostra mais uma funcionalidade desta ferramenta computacional, onde apresenta um quadro de Variação de Tensão de Curta Duração resultante em cada fase no barramento de baixa tensão devido ao curto-circuito. Em consequência da configuração da rede do sistema as tensões sofreram variações consideráveis.

Variação de Tensão de Curta Duração												
Tensão	Corrente	Potência Aparente	Potência Ativa	Potência Reativa	V RMS	IRMS	Fator de Potência	Desequilíbrio	FT Tensão	FT Corrente	VTCD	Outros
	Fase	Início (s)	Término (s)	Duração (s)	Máximo (V)	Mínimo (V)	Classificação	Amplitude (%)				
	A	0,20825	0,32487	0,11662	72,08755	64,9026	AMT	29,50118				
	B	0,20825	0,32487	0,11662	232,368	105,6218	AMT	32,76707				
	C	0,20825	0,32487	0,11662			EIT	105,6218				
	AMT	0,20825	0,32487	0,11662				29,50118				
	EIT	0,20825	0,32487	0,11662				105,6218				

Fig. 11. VTCD diante o curto-circuito.

Assim como para o caso anterior, quando da ocorrência de uma variação de tensão de curta duração na rede, neste caso devido ao curto-circuito supracitado, o cálculo do desequilíbrio que envolve este período também deve ser desconsiderado. Contudo, no intuito de mostrar a potencialidade do aplicativo, a Figura 12 mostra os valores instantâneos de desequilíbrio de tensão no período da ocorrência do distúrbio.

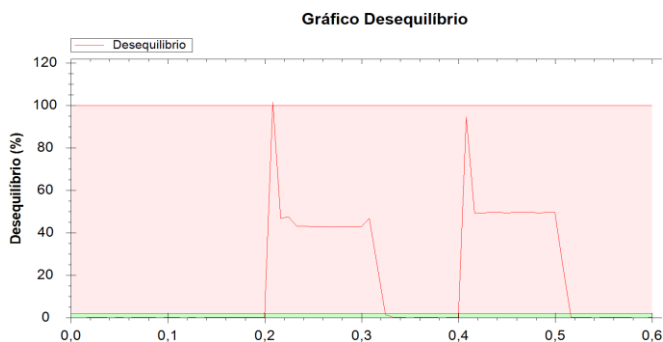


Fig. 12. Desequilíbrio provocado pelo curto-circuito.

C. Distorções harmônicas

A Figura 13 apresenta a interface do distúrbio na opção de distorções harmônicas.

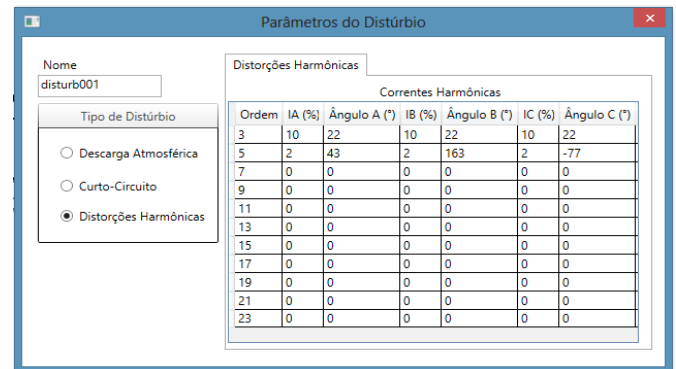


Fig. 13. Injeção de corrente de 3ª e 5ª ordem em todas as fases.

Conforme pode ser observado na Figura 13 é possível inserir as componentes de distorção harmônica de corrente injetadas através do preenchimento da tabela disponibilizada na interface gráfica do programa. Percebe-se que é possível preencher os dados percentuais de cada ordem harmônica, para cada fase, e os seus respectivos ângulos de fase. Desta forma, pode-se simular uma carga não linear apenas pelo conhecimento de sua injeção harmônica, seja pelo conhecimento da carga, ou por meio de medição realizada em campo. No exemplo em foco, como a 3ª harmônica é uma frequência de sequência zero, por definição todas as suas correntes de fase apresentam o mesmo ângulo, entretanto, a 5ª harmônica consiste na componente de sequência negativa, ou seja, sua rotação no diagrama fasorial é o oposto da sequência positiva. A Figura. 14 mostra os oscilogramas das tensões resultantes no barramento de baixa tensão devido a injeção da corrente harmônica injetada. Nota-se que as ondas das tensões se encontram levemente distorcidas, tal fato é explicado pelas quedas de tensões geradas pela circulação das correntes harmônicas na rede, resultando em tensões distorcidas.

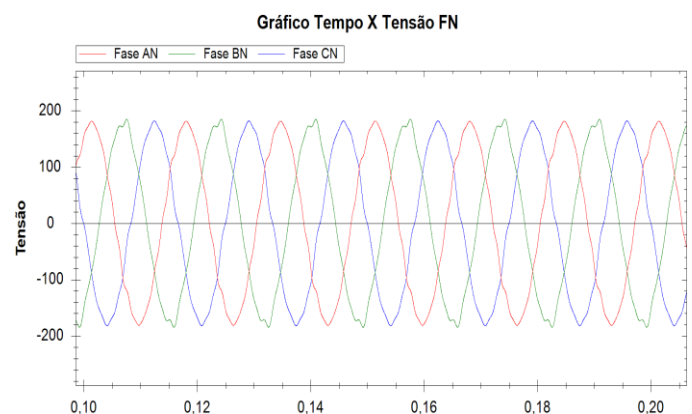


Fig. 14. Formas de ondas das tensões com distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem.

A Figura 15 apresenta as formas de ondas de corrente da carga com a presença da 3ª e 5ª harmônica anteriormente definidas, diante de tal ocorrência, nota-se a importância de se utilizar filtros harmônicos passivos ou ativos, com o intuito de eliminá-los.

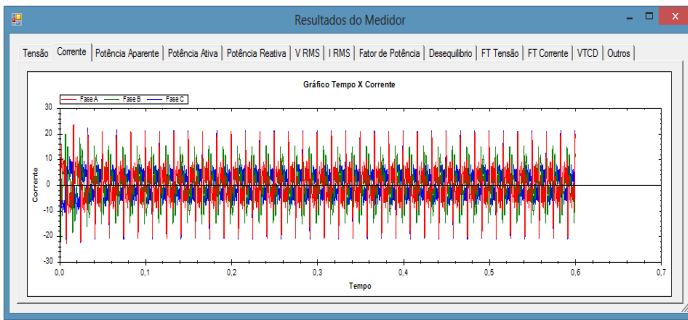


Fig. 15. Formas de ondas das correntes com distorções harmônicas de 3^a e 5^a ordem.

As Figuras 16 e 17 indicam respectivamente os valores de Fourier de tensão e de corrente de cada harmônica devido a injeção de correntes harmônicas na carga. Lembrando que, este medidor tem a capacidade de apresentar até a 25^o ordem harmônica. Apesar das cargas estarem sendo alimentados por correntes harmônicas de 3^a e 5^a ordem, o espectro harmônico de tensão e corrente apresenta outras frequências harmônicas, pelo fato do espectro ter sido extraído no momento do afundamento de tensão. Nesta condição, o elevado valor de desequilíbrio resultou na operação fora do normal do motor, resultando em torques oscilatórios e consequente surgimento de distorções harmônicas de sequencia positiva, negativa e zero. O espectro neste momento também foi escolhido no sentido de mostrar a potencialidade do aplicativo, inclusive da qualidade dos modelos computacionais representativos das cargas, uma vez que a distorção harmônica medida no período do afundamento de tensão não retrata a realidade operativa do sistema elétrico.

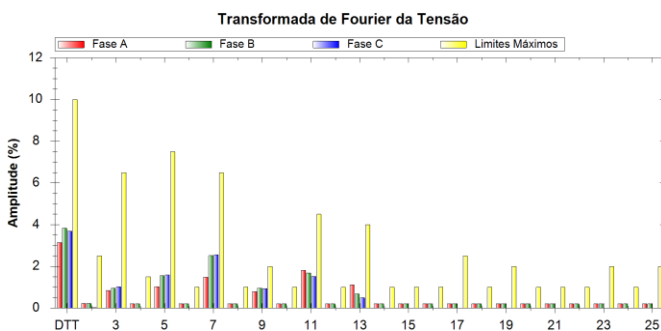


Fig. 16. FT de tensão do sistema analisado.

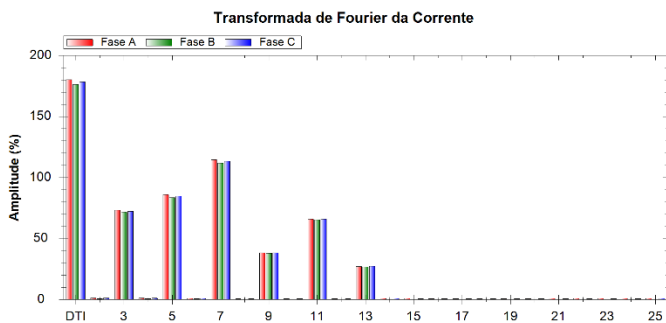


Fig. 17. FT de corrente do sistema analisado.

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma síntese de um aplicativo computacional, denominado por PQA (Power Quality

Analyzer). A intenção foi a de apresentar a sua interface e principalmente o medidor de qualidade da energia, conhecido como qualímetro, o qual se mostrou muito eficiente nesta área, pois o mesmo tem a capacidade de mostrar vários parâmetros envolvidos com o tema em um sistema elétrico quando da ocorrência de um distúrbio na rede elétrica. O produto final obtido permite reproduzir e propagar diversos tipos de distúrbios manifestados nas redes até o ponto de interesse da rede, além da reprodução de cargas não lineares e seus impactos na rede elétrica.

Para a consolidação do programa foi necessário os desenvolvimentos e modelagem computacional representativa dos equipamentos encontrados nas redes de distribuição de energia utilizando o software ATP. A análise da consistência dos desempenhos obtidos pelo aplicativo PQA ofereceram resultados iniciais bastante consistentes com o esperado.

REFERÊNCIAS

- [1] Edgard Franco, "Qualidade de Energia - Causas, Efeitos e Soluções- ENGECOMP TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO E CONTROLE LTDA" UFCG, 2003.
- [2] Carlos Teixeira de Andrade Neto, "Análise de um motor de indução trifásico submetido a tensões de alimentação distorcida", Monografia apresentada na Universidade Federal de Viçosa- 2012.
- [3] A. S. Jucá, "Avaliação do Relacionamento entre Consumidores e Concessionárias na Solução de Conflitos por Danos Elétricos: Proposta de adequação", Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo/SP, 2003.
- [4] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan., S. Santoso., H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, 2nd Edition. USA: McGraw-Hill, 2003.
- [5] DOMIJAN, SANTANDER, GILANI, LAMER, STILES, WILLIAMS. "Watt-hour meter accuracy under controlled unbalanced harmonic voltage and current conditions". IEEE Trans. Power Delivery, vol. 11, p. 64-72, Jan. 1996.
- [6] M. V. B. Mendonça. "Estabelecimento de Metodologia Computacional para Análise de Pedidos de Ressarcimento com Destaque ao Tempo de Uso dos Equipamentos e Respostas Suportabilidades Físicas", UFU, Uberlândia/MG, Outubro de 2009.
- [7] C. E. Tavares, M. V. B. Mendonça, J. C. Oliveira, A. C. Delaiba, R. M. T. Silva, "Aplicativo Computacional para Subsidiar a Análise Técnica de Pedidos de Ressarcimento" - CBQEE 2007, Santos/SP, 2007.
- [8] C. E. Tavares, "Uma Estratégia Computacional para a Análise Técnica de Pedidos de Ressarcimento de Danos a Consumidores", Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia/MG, 2008.
- [9] M. V. B. Mendonça, I. N. Gondim, C. E. Tavares, J. C. de Oliveira, A. C. Delaiba, "Análise Computacional de Pedidos de Indenização por Danos em Equipamentos Elétricos: Estudo de Caso" Faculdade de Engenharia Elétrica, UFU- Universidade Federal de Uberlândia, Março de 2009.