

XIV SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

MEDIÇÃO DE TENSÃO EFICAZ DE LONGA DURAÇÃO

CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHAN
HECTOR ARANGO
NELSON KAGAN
SILVIO XAVIER DUARTE

EPUSP
EFEI
EPUSP
EPUSP

Palavras-chave: tensão de regime permanente,
protocolos de medições,
análise estatística

Foz do Iguaçu, 19 a 23 de novembro de 2000

1. Introdução

O objetivo deste artigo é apresentar a necessidade de padronização para um protocolo de medição da tensão eficaz de longa duração. Este trabalho mostra resultados de ensaios realizados em analisadores de energia e propõe indicadores para o controle da tensão, sobretensão e subtensão eficaz de longa duração, dando ênfase a avaliações estatísticas para os indicadores.

2. Histórico

Atualmente, no Brasil, são diversas as discussões e há muitos trabalhos e pesquisas em desenvolvimento na área de qualidade de energia elétrica. Esta motivação é dada pela nova realidade que o setor elétrico está vivendo, devido ao recente processo de profunda alteração do modelo institucional, incluindo as privatizações. Além disto, o uso intensivo de cargas elétricas mais sensíveis à variação da tensão de fornecimento, amplia a necessidade de análise mais detalhada. No Brasil, com a criação da ANEEL e das agências reguladoras estaduais, o modelo do setor elétrico está passando por um período de transição. Em geral, em paralelo ao processo de privatização, devem estar medidas e procedimentos que visam proteger o patrimônio que será gerenciado pelo capital privado e outros que visam garantir direitos dos consumidores. Considerando estes aspectos, alguns procedimentos estão sendo tomados para efetivar esta necessidade. Esses procedimentos são as medidas mais efetivas que estão em curso para a regulação e a supervisão de indicadores de qualidade da prestação de serviço de distribuição de energia elétrica. Entende-se que quando os órgãos reguladores exigirem índices (ou indicadores) da qualidade de energia elétrica adequados e os supervisionarem e controlarem de maneira efetiva, estarão criando condições para a preservação e melhoria do serviço de fornecimento e também a manutenção adequada dos ativos das empresas de serviço público sob o controle do capital privado e garantirão, conseqüentemente, um atendimento adequado aos clientes.

Há um grande número de trabalhos que têm abordado os problemas de distorções harmônicas de tensão e de corrente, afundamentos ou elevações de tensão de curta duração e outros indicadores, devido ao crescimento do número de cargas sensíveis à estes fenômenos. Não obstante o fato de que a necessidade de considerarmos estes problemas seja uma realidade, o conhecimento da tensão eficaz de regime permanente surge como uma primeira e grande importância no aspecto de conformidade. Sabemos que um grande número dos equipamentos têm um bom funcionamento dependente do valor da tensão eficaz. Assim, o conhecimento adequado do valor da tensão em regime permanente poderá nos fornecer uma avaliação relevante da qualidade de fornecimento de energia elétrica, no seu aspecto mais básico da conformidade.

2.1. Justificativas e Antecedentes

A tensão eficaz em regime permanente é um primeiro indicador de qualidade do produto fornecido pelas concessionárias de distribuição, considerando o aspecto de conformidade. Este indicador poderá informar se houve, por exemplo, sobreaquecimento em equipamentos provocados por distúrbios de longa duração na tensão. Neste aspecto, fabricantes americanos de equipamentos eletrônicos, verificaram que a constante de tempo térmica da maioria dos componentes eletrônicos utilizados é da ordem de 2 min. Portanto, um distúrbio com duração de 10 min, ou seja, 5 vezes a constante de tempo térmica do componente elevaria a temperatura deste a um alto valor de regime. Com procedimento similar, testes realizados na Hydro-Quebec revelaram que a constante de tempo térmica de motores e de pequenos transformadores é da ordem de 24 min. Portanto, distúrbios com duração de 2 h, ou 5 vezes a constante de tempo térmica destes equipamentos conduziram a elevadas temperaturas de regime.

Assim, o intervalo de tempo de 10 min para a avaliação da tensão eficaz de regime permanente, representaria bem os efeitos térmicos em equipamentos eletrônicos. Os motores e transformadores também estariam bem representados, pois o período amostral contemplaria intervalos bem maiores que os 10 min. Considerando o que recomenda a IEC, os intervalos de tempo para a avaliação do indicador de qualidade de tensão eficaz deveriam ser de 3 s para valores de curta duração e de 10 min para valores de longa duração em regime permanente. Já em outras referências, como a Canadian Electric Association (CEA) existe também a sugestão para avaliação em intervalos de 2 h.

A IEC também indica como deve ser formada a amostra de 3 s ou 10 min. De acordo com esta norma, a composição da amostragem das ondas de tensão deve ser sincronizada e contínua, em sub-intervalos (janelas) de 8 a 12 ciclos, com no mínimo 512 amostras de valores instantâneos (64 amostras por ciclo de 60 Hz). Neste ponto, cabe observar, que as amostras de 3 s serão formadas por subamostras (janelas) de 8 a 12 ciclos. A formação de uma amostra de 10 min utilizará subamostras de 3 s. E finalmente, amostras de 2 h seriam formadas por subamostras de 10 min.

Observa-se, portanto, que não é trivial efetuar uma medição de tensão eficaz de regime permanente de forma a garantir uma amostra de valores que realmente represente a qualidade de fornecimento. Uma medição adequada deverá incluir requisitos diversos, alguns destes elencados a seguir:

- a monitoração deverá informar ao usuário qual o nível de tensão e quanto tempo este permaneceu fora dos padrões. Para a avaliação da tensão em regime permanente, devem ser considerados procedimentos para tratar condições não permanentes como os transitórios de tensão, a fim de não incompatibilizar sua representatividade.
- o sistema (ou instrumento) de aquisição deverá possuir opções de escolha dos intervalos de medição conforme padrões internacionais, por exemplo a IEC 1000-3-6.
- criar condições de agregar, no futuro, outros indicadores de qualidade, de maneira simples, utilizando o mesmo suporte de hardware disponível e acrescentando-se funções ao software existente.
- possibilidade de fácil manipulação e armazenamento de dados, constituindo assim, um banco de dados seguro e acessível a qualquer tempo e além disto, disponibilizar um diagnóstico da tensão eficaz de regime permanente (e outros indicadores no futuro), considerando as recomendações dos órgãos reguladores quanto ao que se refere a forma de apresentação dos resultados (no caso do estado de São Paulo, curvas de distribuição de probabilidades de tensões).

2.2. Equipamentos Disponíveis e Diferenças no Tratamento de Dados

Diversos são os fabricantes de equipamentos e os tipos (modelos de equipamentos) existentes atualmente no mercado para medição de grandezas elétricas. Estes equipamentos podem ser classificados para várias finalidades de aplicações. Porém, poucos são os equipamentos que se adaptam às necessidades da área de qualidade de energia. Destes poucos, podemos destacar os equipamentos destinados a monitoração da energia elétrica, em geral denominados analisadores de energia. Com o objetivo de comparar as respostas de alguns instrumentos de medição, utilizados para avaliação de energia elétrica, quanto aos valores de tensões obtidos pelos equipamentos, para um determinado intervalo de integração (por exemplo cinco minutos) foi realizada uma seqüência de testes em quatro equipamentos denominados analisadores de energia, de diferentes fabricantes [3].

2.2.1. Caracterização dos Testes em “Analisadores de Energia”

Os testes compreenderam a medição de tensão eficaz monofásica, com variações lentas na amplitude, tomada na saída de um autotransformador variável, cuja excursão é feita manualmente, por um operador. O autotransformador, por sua vez, foi alimentado por uma tensão fase-neutro da rede de baixa tensão, cujo valor nominal é de 127 V. A Figura 1 a seguir ilustra o circuito teste utilizado.

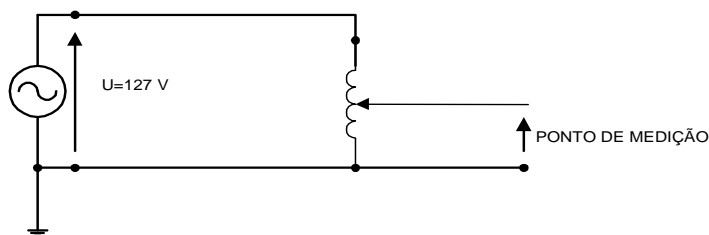


Figura 1 – Circuito elétrico esquemático para aplicação de teste de variação da tensão

Considerando o circuito da figura 1, estabeleceram-se três níveis para a tensão no ponto de medição: 31.8 V (25%), 63.5 V (50%) e 92.3 V (75%) da tensão nominal de 127 V. O intervalo estabelecido foi de 5 minutos, disponíveis em todos os instrumentos e suficientemente grande para evitar a influência da variação manual do autotransformador. Foram realizados testes consecutivos, cada um correspondendo a uma dada configuração de tensão, ao longo do intervalo de 5 minutos, conforme representado na Figura 2.

Testes de tensão eficaz

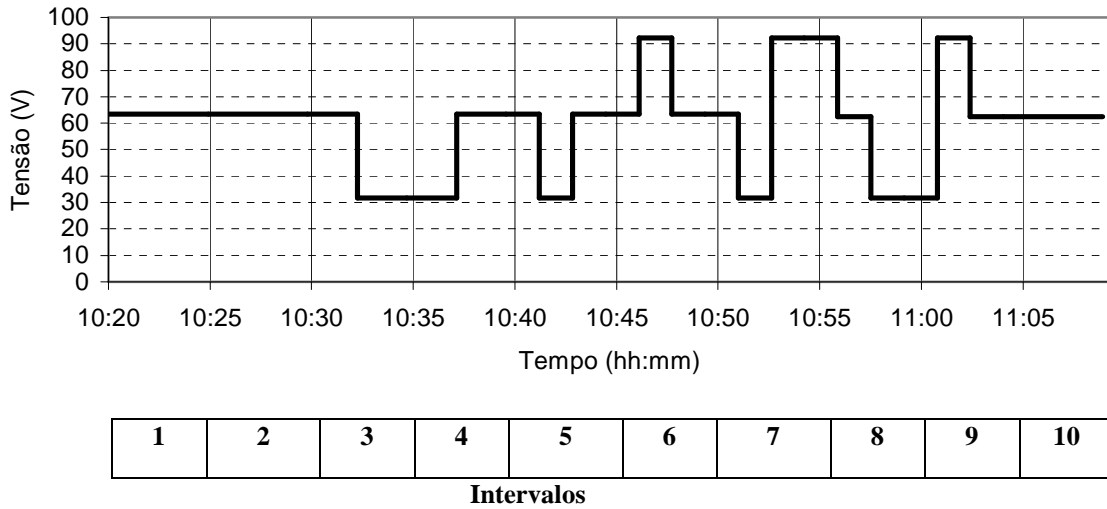


Figura 2 – Testes de tensão aplicados em intervalos de 5 minutos

Observa-se na figura 2 que :

- a tensão nos intervalos 1,2 e 10 foi fixada em 63.5 V (50% do valor nominal), constante durante todo intervalo.
- nos intervalos 3 e 4 tentou-se simular uma variação brusca na tensão no meio do intervalo, permanecendo a tensão no teste 3 durante os primeiros 2,5 minutos do intervalo em um valor de 50% e os 2,5 minutos restantes do intervalo em um valor de 25% da tensão nominal. No teste 4 a primeira metade do intervalo inicia-se com tensão de 25% e na metade restante 50% do valor nominal. Estes intervalos tiveram o objetivo de avaliar a influência da variação da tensão ao início e ao final do intervalo.
- os intervalos 5 e 6 tiveram o objetivo de simular uma subtensão e uma sobretensão que ocorra no meio do intervalo e com duração de 1/3 do intervalo, que corresponde a 1 min e 40 s.
- os intervalos 7 e 9 tiveram o objetivo de simular uma condição em que a tensão média é igual a 50%, porém com diferentes distribuições de patamares de tensão: 25%, 50% e 75% com duração de 1/3 do intervalo.

2.2.2. Instrumentos Utilizados

Para a avaliar a tensão eficaz foram realizados testes utilizando-se quatro instrumentos digitais disponíveis no laboratório da EPUSP. Considerando-se que as comparações em questão são apenas de interesse acadêmico, não serão citados os equipamentos nem seus respectivos fabricantes: chamaremos os mesmos por instrumentos A, B, C e D.

- Instrumento A – Mede tensões e correntes eficazes em sistemas trifásicos, com intervalo de no mínimo 1 s. Disponibiliza potência ativa, reativa e aparente de fase e trifásica, fator de potência e energia. Além disto, possibilita análise de distorções harmônicas.
- Instrumento B - Mede tensões e correntes eficazes em sistemas trifásicos, com intervalo de no mínimo 1 min. Disponibiliza potência ativa, reativa e aparente de fase e trifásica, fator de potência e energia. Além disto, possibilita análise de distorções harmônicas.
- instrumento C - Mede tensão e corrente eficaz e de pico em sistemas monofásico, com intervalo de no mínimo 10 s. Disponibiliza potência ativa, reativa e aparente de fase, fator de potência e energia. Além disto, possibilita análise de distorções harmônicas.
- Instrumento D - Mede tensões e correntes eficazes em sistemas trifásicos com intervalo de no mínimo 1 s. Disponibiliza potência ativa, reativa e aparente de fase e trifásica, fator de potência e energia.

2.2.3. Resultados dos Testes

A Tabela 1, a seguir, apresenta um sumário comparativo entre as respostas dos instrumentos:

Tabela 1 – Comparações entre resultados dos testes aplicados

Intervalo	Tensão no início	Tensão no final	Tensão média		Respostas dos Instrumentos			
			Aritmética	Quadrática	A	B	C	D
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	50	50	50	50	50	50	50	49
2	50	50	50	50	50	50	50	49
3	50	25	37.5	39.5	39.3	50	50	35
4	25	50	37.5	39.5	39.2	25	25	38
5	50	50	41.7	43.3	43.5	50	50	41
6	50	50	58.3	59.5	59.5	50	50	56
7	50	75	50	54	53.3	50	50	49
8	75	25	50	54	53.8	75	75	46
9	25	50	50	54	53.6	25	25	49
10	50	50	50	50	49.8	50	50	47

Considerando os resultados anteriores é possível constatar que:

- as respostas dos instrumentos B e C se baseiam apenas nas tensões registradas no início de cada intervalo de registro, não indicando a ocorrência de sobretensões ou subtensões ocorridas ao longo do intervalo de registro.
- a resposta do instrumento A mostra que o mesmo, aparentemente, estabelece a média quadrática dos valores de tensão ocorridos ao longo do intervalo de registro, o que julgamos ser mais adequado (torna a amostra do intervalo mais representativa) para avaliação de variações de longa duração da tensão da rede.
- a resposta do instrumento D mostra que o mesmo, aparentemente, estabelece uma média mais próxima da aritmética dos valores de tensão ocorridos ao longo do intervalo de registro, podendo também ser considerada adequada.

A conclusão que podemos obter a partir da avaliação dos ensaios anteriores, é a necessidade de estabelecimento de um protocolo de medição de tensão eficaz para efeito de fiscalização. No caso de uso de equipamentos de mercado, há a necessidade de conhecer e avaliar a influência que diferentes protocolos de medição de tensão eficaz podem provocar. Isto é muito importante quando houver necessidade de se fazer comparações ou análises entre campanhas de medições de tensão, efetuadas com diferentes instrumentos.

3. Critério para Controle e Fiscalização

Partindo de informações sobre controle de tensão eficaz de longa duração, em outros países, podemos constatar que existe um consenso quanto aos valores de tensão medidos. Esses valores em geral são as médias quadráticas, calculadas em intervalos de dez minutos (para algumas referências e, em outras, não há comentário a esse respeito). A partir desses valores, após um período de uma semana será feita uma avaliação estatística para algumas referências e, em outras, uma avaliação mais determinística dos valores de tensão eficaz.

Realmente, estabelecer um indicador de tensão eficaz, que seja capaz de representar as condições operativas a que foram submetidos os equipamentos, não é tarefa simples. Entretanto, como o objetivo principal é inferir, a partir destes indicadores condições de fornecimento, é justificável que analisemos alguns algoritmos utilizados para estimar estes valores de tensão com um pouco mais de detalhe. Diante desta perspectiva, o trabalho analisará quais as influências de diferentes protocolos de medição da tensão eficaz, levando em conta diferentes possibilidades, quanto ao intervalo de cálculo da tensão, propondo a

formação de outros indicadores, como o de sobretensão e subtensão, conforme proposto pela Canadian Electric Association (CEA).

4. PROTOCOLOS DE MEDIÇÃO DA TENSÃO EFICAZ

4.1. Célula Básica de Protocolo

A célula fundamental para a quantificação da tensão em regime permanente utilizada na referência [1], apoia-se em fatores da qualidade da tensão determinados em janelas de 8 a 12 ciclos, conforme IEC (1000-4-7). Estes fatores são a tensão eficaz instantânea IRV (instantaneous rms voltage), a sobretensão eficaz instantânea IRO (instantaneous rms overvoltage) e a subtensão eficaz instantânea IRU (instantaneous rms undervoltage). O algoritmo propõe duas maneiras possíveis para o cálculo do valor eficaz da tensão em cada janela.

Na primeira maneira, o valor eficaz da tensão calculado para cada janela j (IRV $_j$) é dado pelo somatório dos valores eficazes das tensões, calculados para cada ordem harmônica, da primeira até a quadragésima ordem harmônica.

A segunda maneira de se calcular o valor eficaz da tensão para cada janela j (IRV $_j$) é através da utilização do método de integração trapezoidal.

Obtido o valor de tensão eficaz (IRV $_j$) através de uma das possíveis maneiras anteriormente descritas, deve-se obter o valor de sobretensão eficaz (IRO $_j$) e o valor de subtensão eficaz (IRU $_j$) para cada janela de cálculo, utilizando as expressões 1 e 2 respectivamente.

$$IRO_j = \max \left\{ 0, \frac{IRV_j - U}{U} \times 100 \right\} \quad (1)$$

$$IRU_j = \max \left\{ 0, \frac{U - IRV_j}{U} \times 100 \right\} \quad (2)$$

onde:

U : é o valor da tensão nominal ou tensão declarada.

De acordo com o procedimento estabelecido anteriormente, a cada intervalo de tempo correspondente a uma janela teremos três indicadores para a tensão eficaz que são:

- a tensão eficaz (IRV);
- sobretensão eficaz (IRO);
- subtensão eficaz (IRU).

A figura 3 indica os valores de tensão eficaz calculados em janelas de 200 ms (estes valores foram obtidos a partir de medições), espaçadas umas das outras num intervalo de tempo (Δt) de 300 ms, portanto, a cada 500 ms obtém-se os valores de tensão eficaz (IRV). A figura 4 indica a sobretensão eficaz (IRO) e a figura 5 a subtensão eficaz (IRU) obtidas para as correspondentes janelas. Considerou-se a tensão nominal de 127 V.

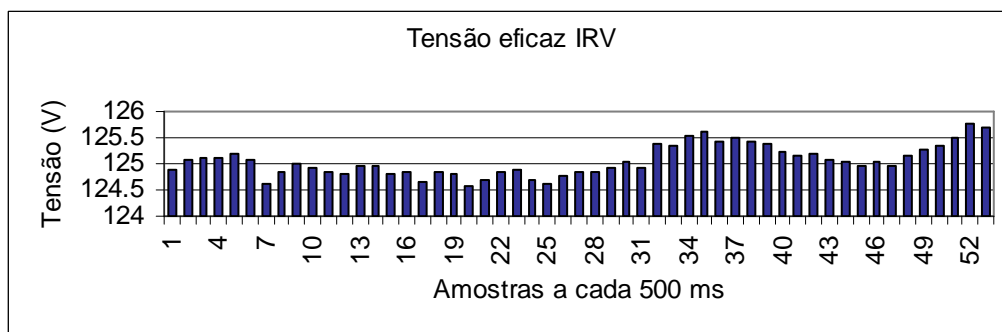


Figura 3 – Tensão eficaz (IRV) para janela de 200 ms a cada 500 ms

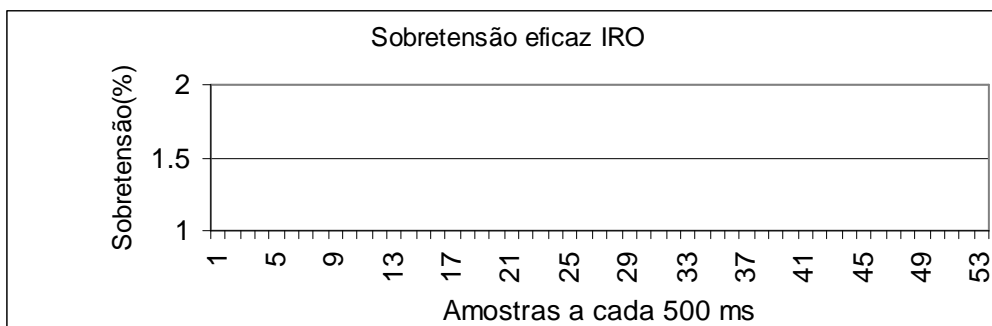


Figura 4 – Sobretensão eficaz (IRO) para janela de 200 ms a cada 500 ms

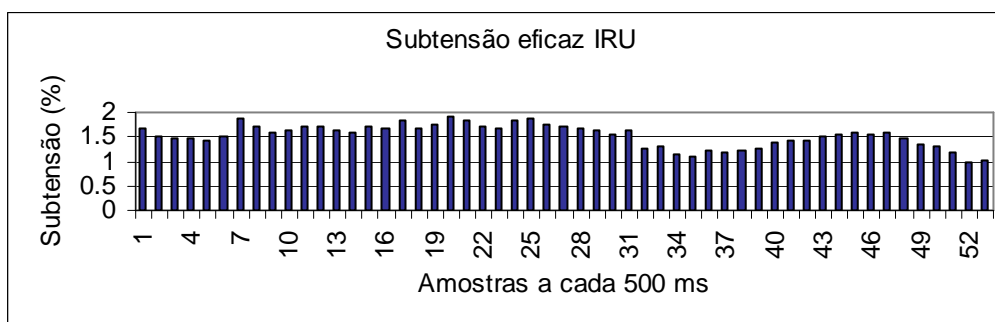


Figura 5 – Subtensão eficaz para janela de 200 ms a cada 500 ms

Este intervalo de tempo deve ser o maior possível, a fim de economizar recursos computacionais (tempo de processamento ou tratamento) e o menor possível, de maneira a reduzir erros na representatividade estatística dos resultados.

4.2. Princípio da Amostragem

Efetuada-se um dos procedimentos anteriores, considerando ou não a análise espectral, obtêm-se os valores de tensão eficaz (IRV), sobretensão eficaz (IRO) e subtensão eficaz (IRU) para cada janela de aquisição. Definem-se desse modo, os fatores de qualidade da tensão QFV (quality factor variable) associados a intervalos de 3s, 10 min e 2 h, os fatores de qualidade de tensão, associados ao intervalo de 3s estão definidos na tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Fatores de qualidade de tensão, sobretensão e subtensão

Fator de Qualidade	Descrição do Fator de Qualidade
IRV(3s-inst)	é o fator de qualidade de tensão eficaz instantâneo para um intervalo de 3 s
IRV(3s-rms)	é o fator de qualidade de tensão eficaz para um intervalo de 3 s
IRO(3s-inst)	é o fator de qualidade de sobretensão eficaz instantâneo para um intervalo de 3 s
IRO(3s-rms)	é o fator de qualidade de sobretensão eficaz para um intervalo de 3 s
IRU(3s-inst)	é o fator de qualidade de subtensão eficaz instantâneo para um intervalo de 3 s
IRU(3s-rms)	é o fator de qualidade de subtensão eficaz para um intervalo de 3 s

4.3. Intervalo Deslizante de 3 s

Para a obtenção do fator de qualidade, o tempo é dividido em intervalos de referência, iguais ao intervalo para o qual se deseja determinar o fator de qualidade. Assim, para a avaliação do fator de qualidade para um intervalo de 3 s, o tempo é dividido em intervalos de 3 s e assim por diante. Por simplificação o tempo

é descrito pelo fim dos intervalos de referência. Portanto, para a determinação do fator de qualidade de 3 s, ou 3000 ms, o instante i corresponde ao fim do intervalo i , ou, em ms, 3000 ms. Para se obter o número de amostras m , existentes no intervalo de referência de 3 s deve-se utilizar a expressão 3:

$$m = \frac{3000}{T} \quad (3)$$

onde:

m : é o número de amostras no intervalo de 3 s
 T : é o tempo de duração de cada janela de aquisição.

Para se obter o fator de qualidade de tensão eficaz para um intervalo de referência de 3 s, devemos, primeiro determinar o fator de qualidade de tensão eficaz instantâneo. Este fator de qualidade de tensão eficaz instantâneo será a média quadrática de um conjunto de m valores de tensões, anteriormente obtidos, atualizando-os a cada novo intervalo de janela de aquisição ocorrida. A figura 6 ilustra fatores de qualidade de tensão instantâneos IRV(3s-inst) calculados a partir dos valores de tensões IRV indicados na figura 3.

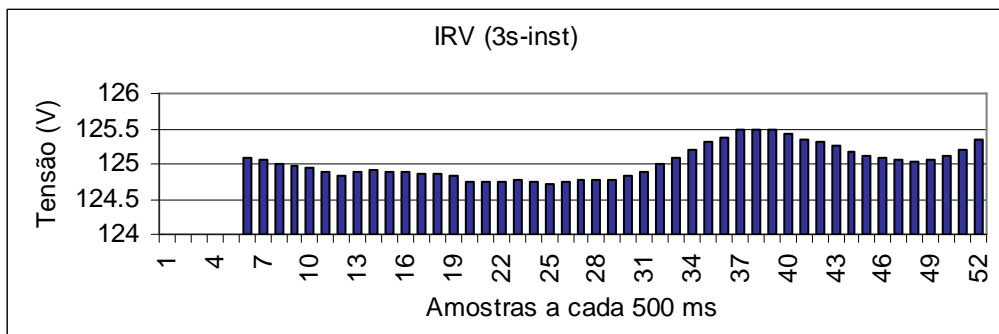


Figura 6 – Fatores de qualidade de tensão eficaz instantâneos

Analogamente, a figura 7 indica fatores de qualidade de sobretensão eficaz instantâneo IRO (3s-inst) calculados a partir dos valores de sobretensões IRO, indicados na figura 4. Na figura 8 os correspondentes fatores de qualidade de subtensão eficaz instantâneos IRU(3s-inst) são calculados a partir dos valores de subtensões IRU indicados na figura 5.

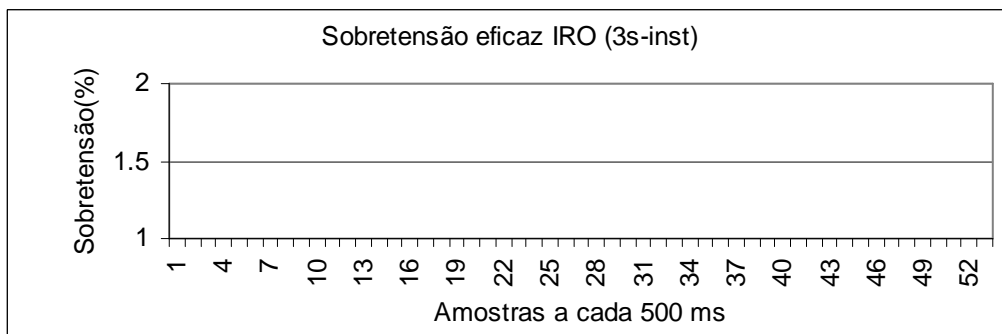


Figura 7 – Fatores de qualidade de sobretensão eficaz instantâneos

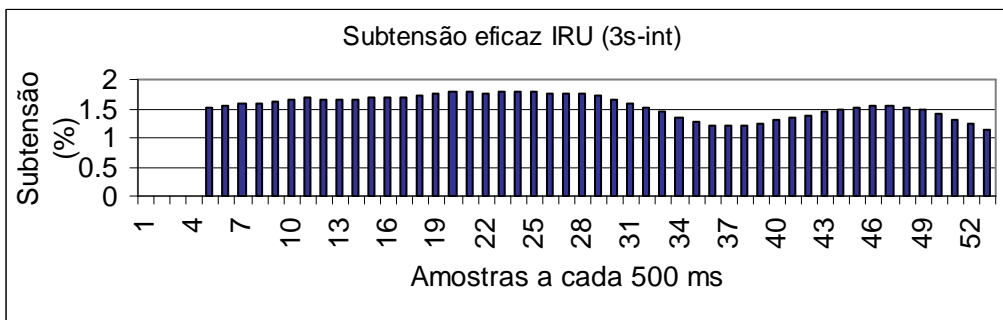


Figura 8 – Fatores de qualidade de subtensão eficaz instantâneos

Após obtidos m fatores de qualidade instantâneos deve ser determinado o fator de qualidade de tensão eficaz, como sendo o máximo de um conjunto de m fatores de qualidade instantâneos, previamente calculados. A expressão (3) indica o número de m intervalos existentes. As figuras 9, 10 e 11 indicam os fatores de qualidade de tensão, sobretensão e subtensão eficazes calculados a partir dos valores dos fatores de qualidade instantâneos indicados nas figuras 6, 7 e 8, respectivamente.

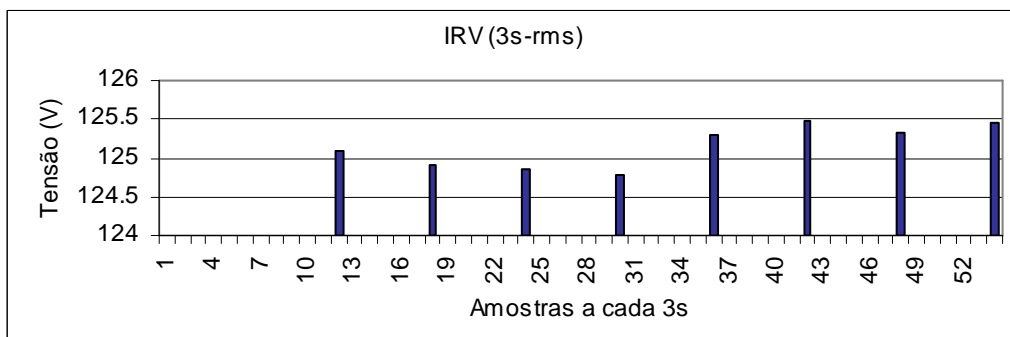


Figura 9 – Fator de qualidade de tensão eficaz com intervalo de 3s

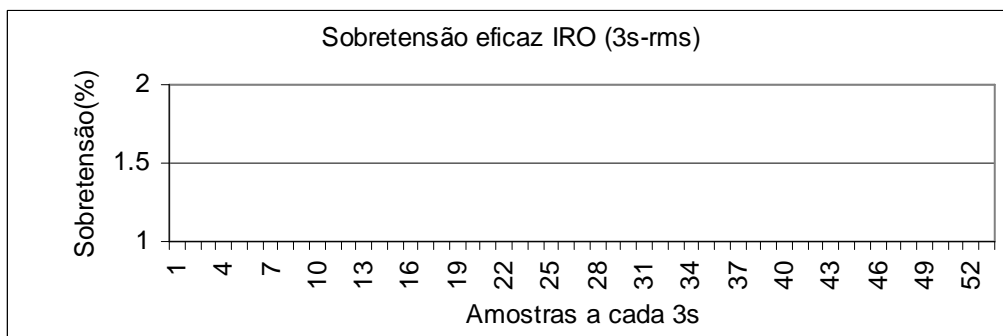


Figura 10 – Fator de qualidade de sobretensão com intervalo de 3s

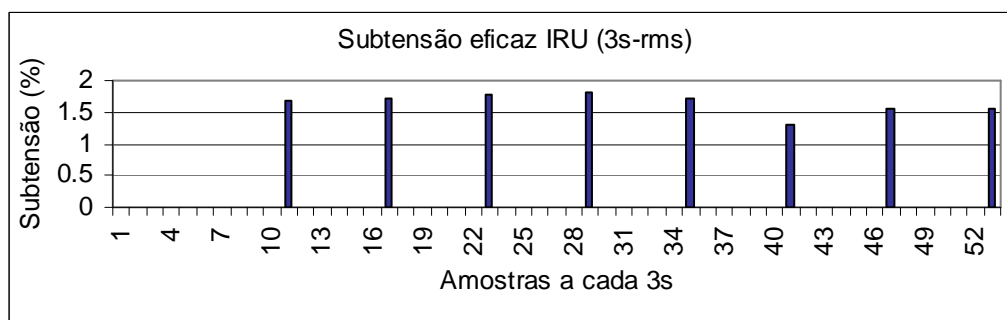


Figura 11 – Fator de qualidade de subtensão com intervalo de 3s

Para determinar os fatores de qualidade de tensão, sobretensão e subtensão eficazes para o intervalo de referência de 10 min os valores dos indicadores obtidos para o intervalo de 3 s serão utilizados como dados de entrada no algoritmo, que utiliza o mesmo procedimento anterior, porém, o número de amostras de 3 s existentes em um intervalo de 10 min é de 200. Para obterem-se indicadores de qualidade para um intervalo de 2 h os valores dos indicadores calculados para o intervalo de 10 min serão, conseqüentemente, utilizados como dados de entrada, utilizando, assim, o mesmo procedimento. O número de intervalos de 10 min existentes em um intervalo de 2 h é de 12 intervalos.

5. Características dos indicadores Propostos

Antes de iniciar a análise de algumas medições, é importante ressaltar os objetivos a que se prestaria cada um dos indicadores a serem tratados. A partir dos valores de tensões eficazes medidos com intervalo de leitura de 3 s, 10 min e 2 h pode-se obter vários indicadores de qualidade, cada um destes, ressaltando um aspecto diferente do sistema ou ponto de medição. Estes indicadores conforme comentários anteriores, podem ser:

- a função distribuição de tensão (FDT);
- a função freqüência acumulada de tensão;
- a função freqüência acumulada de sobretensão;
- a função freqüência acumulada de subtensão;

Baseando-se no fato de que os indicadores propostos podem ser formados por valores medidos com intervalos de leitura diferentes, é importante notar que os intervalos definidos têm funções bem específicas, ou seja, os intervalos de leitura têm o objetivo de refletir os efeitos térmicos em equipamentos de diversas naturezas, com diferentes constantes de tempo térmica.

A figura 12 ilustra a temperatura de operação de um equipamento e a respectiva tensão de leitura de 3 s aplicada ao mesmo. Observa-se que este intervalo de leitura é cinco vezes a constante de tempo térmica de 600 ms, que representa uma classe de componentes eletrônicos. Foi admitido que a temperatura do equipamento tivesse relação linear com o acréscimo de potência, que em equipamentos com características resistivas, é função direta do quadrado da tensão. Para sabermos efetivamente como ocorre a variação de temperatura em equipamentos do tipo componentes eletrônicos, motores, transformadores e outros, é preciso primeiro estabelecer qual a lei de variação da temperatura de operação destes equipamentos, em função da tensão. Em alguns casos, uma redução na tensão não implica necessariamente, em redução da temperatura de operação do equipamento, exemplo típico deste fato são alguns motores elétricos.

É importante notar que, grandes variações observadas na tensão com um intervalo de leitura de 3 s serão “filtradas” quando forem obtidos os valores de tensão de leitura de 10 min. Esse processo sugere que deve-se escolher o indicador mais adequado para avaliar os efeitos térmicos sobre diferentes tipos de equipamentos.

Em equipamentos cuja constante de tempo térmica é maior, as variações na tensão de curta duração não devem ser consideradas, ou seu efeito deve ser atenuado. Os efeitos térmicos possuem resposta mais lenta e assim sendo o protocolo deve refletir este princípio natural de seleção de efeitos.

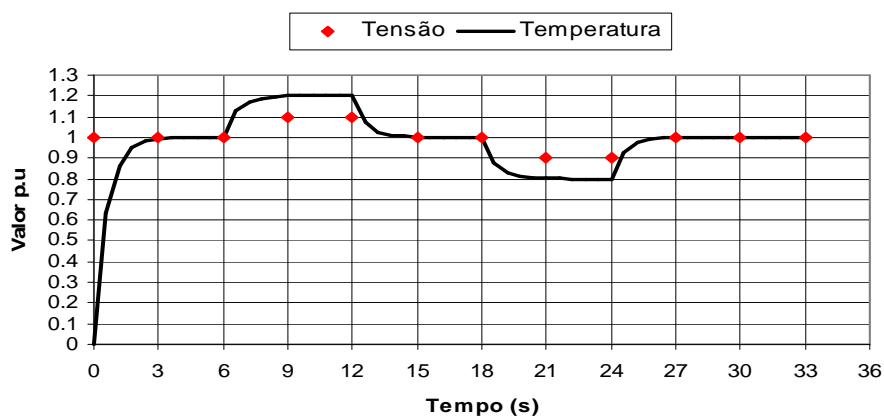


Figura 12 – Tensão de leitura de 3 s e temperatura de um equipamento

Embora a tensão de leitura possa representar, de maneira adequada os efeitos térmicos em equipamentos de diversas naturezas, ela não é capaz de identificar se ocorreram no intervalo de leitura tensões muito acima ou abaixo da nominal, visto que estas foram filtradas pelo cálculo feito por médias (quadráticas) de valores obtidos em intervalos menores. Neste caso, os indicadores de sobretensão e subtensão possibilitam investigar se ocorreram, ao longo do intervalo de leitura, grandes flutuações na tensão. Este indicador pode ser, tanto mais importante, quanto maior for o intervalo de leitura utilizado.

Analisando todos os intervalos de leitura mostrados na figura 13, podemos perceber que as tensões medidas em todos os intervalos foram de 1 p.u. Entretanto, ocorreram variações superiores e inferiores à nominal, nos intervalos de 10 a 20 min e de 30 a 40 min, que não foram registradas pela tensão de leitura de 10 min, mas foram registradas pelos valores de sobretensão e subtensão, que nestes intervalos foram de 14%, como indica a figura 13. Estes indicadores de sobretensão e subtensão explicitam que, embora a tensão média quadrática tenha se mantido em um valor de 1 p.u., ocorreram grandes flutuações na tensão nestes intervalos.

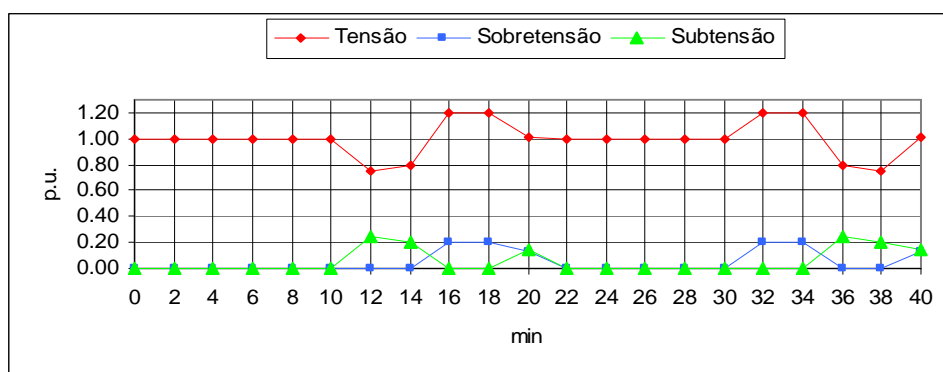


Figura 13 – Valores de tensão, sobretensão e subtensão

5.1. Função Distribuição de Tensão

A função distribuição de tensão pode oferecer para cada um dos referidos intervalos de leitura, avaliações das durações em cada nível de tensão dando uma idéia dos efeitos térmicos em equipamentos diferentes.

O indicador obtido com intervalo de leitura de 3 s pode oferecer uma avaliação de quanto tempo a tensão ficou fora dos limites adequados para equipamentos com constantes de tempo térmica da ordem de 600 ms (componentes eletrônicos). Ou seja, o indicador oferece uma ferramenta para análises direcionadas a um universo bem específico de equipamentos. Possivelmente em função da sensibilidade de cada equipamento poder-se-á admitir maiores desvios nos valores de tensão, com durações de tempo fora dos limites menores.

O indicador obtido com intervalo de leitura de 10 min, oferece a possibilidade de se fazer avaliações considerando equipamentos com constante de tempo térmica de 2 min. Este indicador, pode ser denominado de tensão de média duração de regime permanente. É recomendável que os limites admitidos de desvios na tensão sejam menores, e que o tempo permitido para a tensão ficar fora dos limites seja de 5% ou menor, conforme sugere a maioria das normas internacionais.

Já o indicador de tensão obtido com intervalo de leitura de 2 h, oferece a possibilidade de avaliações considerando equipamentos, com constante de tempo térmica de 24 min (certos motores de pequeno porte e transformadores). Neste caso, menores devem ser os limites admitidos nos desvios da tensão e menores os intervalos de tempo fora dos limites admissíveis.

Naturalmente, os limites a serem estabelecidos para os níveis de tensão mínimo e máximo, bem como o tempo em que se permitirá que a tensão permaneça fora destes limites, será função de um melhor conhecimento da resposta térmica dos equipamentos, quando submetidos a variações na tensão. Também há uma dificuldade em se estabelecer qual é o intervalo de leitura mais representativo para o universo de consumidores instalados num sistema e suas cargas elétricas. É importante ressaltar que o tempo em que será permitido ficar fora dos limites adequados de tensão, e os limites máximo e mínimo de tensão serão variáveis em função do intervalo de leitura e do grau de sensibilidade a ser estabelecido para cada tipo (família) de equipamento. Naturalmente, somente a adoção de mais de um indicador, com diferentes intervalos de leitura oferecerá uma avaliação mais precisa da conformidade da tensão.

5.2. Frequência Acumulada de Tensão

A função frequência acumulada de tensão é a integração da função distribuição, sendo portanto influenciada pelos intervalos de leitura. Nesta função poderemos determinar diretamente qual o tempo em que a tensão ficou abaixo ou acima (por diferença) de um determinado valor de tensão de referência.

5.3. Frequência Acumulada de Sobretensão e Subtensão

Estes indicadores servirão como parâmetro de aferição dos indicadores de tensão, ressaltando as flutuações na tensão ao longo do intervalo de leitura. Assim poderemos obter o tempo em que o valor de sobretensão ou subtensão ficou abaixo de determinado valor de referência. Estes indicadores observados em conjunto traduzirão (grandes) flutuações durante os intervalos de leitura.

6. Características Técnicas Básicas para um Sistema de Aquisição de Sinais de Tensão e ou Corrente e Tratamento de Dados.

Um sistema de aquisição de sinais de tensão e corrente cujos dados serão utilizados para avaliação de indicadores da qualidade de energia, deverá possuir, independente de ser um medidor específico para aquisição de sinais e tratamento de dados, ou um outro sistema qualquer desenvolvido para este fim, as seguintes características técnicas básicas:

- ser de fácil instalação, considerando que este poderá ser móvel para a medição de consumidores individuais ou alimentadores individuais;
- ser resistente ao intemperismo, considerando que poderá ser instalado ao tempo;
- ser de fácil e rápida operação, pois poderá ser utilizado em uma empresa por diversos operadores;
- permitir conexão de até quatro potenciais de tensão, para medição de redes trifásicas com neutro, contando com possíveis ligações em sistemas diversos, preferencialmente com isolamento galvânica;
- permitir conexão de até quatro entradas de corrente elétrica;
- possibilitar a alteração dos transdutores de tensão ou corrente em função da necessidade de instalação do equipamento em vários níveis de tensão, ou de corrente;
- possuir memória de massa, capaz de registrar vários dias de medição contínua. (quando não for um “medidor - PC”);
- possibilitar alteração dos tempos de intervalos de integração, considerando protocolos especificados por órgãos reguladores;
- possibilitar fácil comunicação de dados registrados, através de interfaces de comunicação serial RS 232/485. (quando não for um “medidor - PC”);
- possuir velocidade de conversão A/D compatível, considerando a garantia de uma amostragem mínima de 64 amostras por ciclo de 60 Hz, conforme recomenda IEC.

7. Análise de Resultados

Foi realizada uma medição, utilizando o intervalo de leitura de 3 s. Foram obtidos posteriormente, através de um algoritmo para tratamento de dados, os valores de tensão com intervalos de leitura de 5 min, 10 min, 1 h e 2 h para posteriores comparações entre os indicadores com diferentes intervalos de leitura.

Para simplificar, será feita uma avaliação comparando as funções de distribuição de tensões obtidas para a fase AN, escolhida entre as demais aleatoriamente. As figuras 14, 15, 16, 17 e 18 mostram as funções de distribuição de tensão e a figura 19 as funções acumuladas das tensões obtidas para a fase AN, com os vários intervalos de leitura propostos.

Analisando as funções de distribuição de tensão da fase AN para os intervalos de leitura de 3 s, 5 min, 10 min, 1 h e 2 h, podemos notar que:

- quanto menor o intervalo de leitura, maior será a variação observada nos limites extremos de tensão obtidos para cada um dos intervalos de leitura;
- para esta medição, podemos perceber que os intervalos de leitura de 3 s, 5 min e 10 min atingiram os mesmos valores extremos (superior e inferior), e com diferenças de probabilidade de ocorrência em cada faixa, entre cada intervalo de leitura, da ordem de 1 %, deixando estes indicadores muito próximos um do outro, formando para esta análise, o que chamaremos de grupo 1 de indicadores.
- da mesma maneira, os indicadores obtidos com intervalos de leitura de 1 h e 2 h formam o que chamaremos de grupo 2 de indicadores, que, para esta medição e este grupo, atingiram também os

mesmos extremos (superior e inferior), e com diferenças de probabilidades de ocorrência entre eles, da ordem de 2 %.

- comparando agora os dois grupos anteriores, observamos uma diferença entre os extremos (superior e inferior), entre os dois grupos da ordem de 1 %, que não é desprezível. É importante verificar também que as diferenças de probabilidades de ocorrência são muito superiores que as obtidas entre os elementos de cada grupo. Neste caso constatamos diferenças de probabilidade de ocorrência de até 11 % entre os dois grupos, não sendo desprezíveis.
- apenas para chamar a atenção, o ponto onde foi realizada a medição, pode ser considerado um local da rede elétrica onde o controle da tensão é bom, pois é um ponto próximo ao transformador de distribuição, que está ligado à subestação por um alimentador curto. Além disto é um sistema de distribuição subterrâneo, um local privilegiado. Por este motivo estas conclusões são preliminares devendo o programa de medição ser estendido a outros locais da rede elétrica.

Analisando as funções de frequência acumuladas de tensão obtida para a fase AN, para os intervalos de leitura de 3 s, 5 min, 10 min, 1 h e 2 h, confirmamos o que foi observado na análise das funções de distribuição de tensão. Pode-se notar mais uma vez, que as funções de frequência acumuladas mostradas na figura 19, praticamente se sobrepõem, considerando cada grupo individualmente.

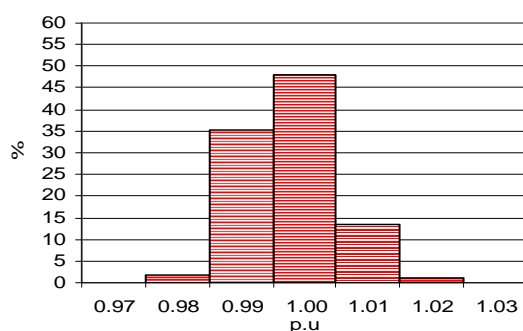


Figura 14 – Função distribuição de tensão na fase AN, com intervalos de leitura 3 s

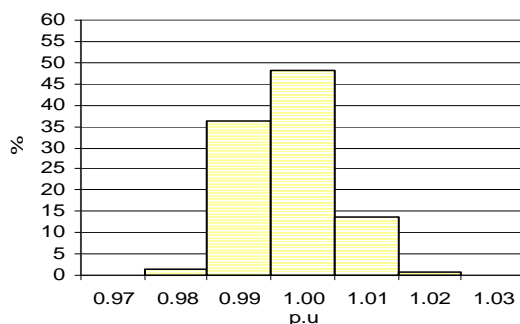


Figura 15 – Função distribuição de tensão na fase AN, com intervalos de leitura 5 min

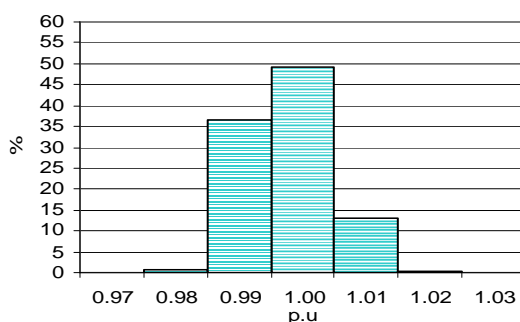


Figura 16 – Função distribuição de tensão na fase AN, com intervalos de leitura 10 min

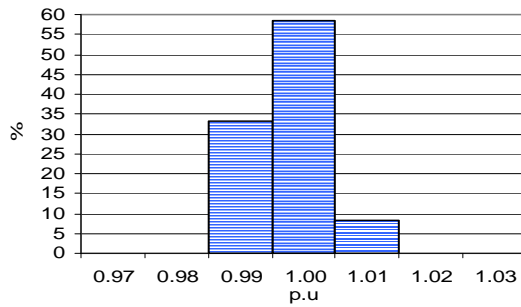


Figura 17 – Função distribuição de tensão na fase AN, com intervalos de leitura 1 h

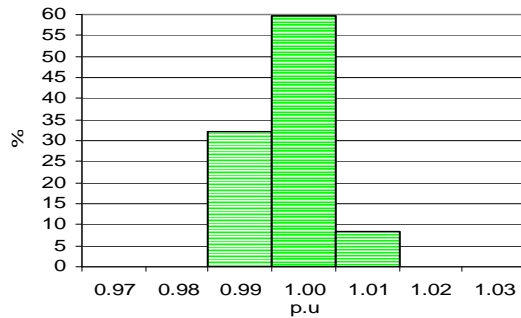


Figura 18 – Função distribuição de tensão na fase AN, com intervalos de leitura 2 h

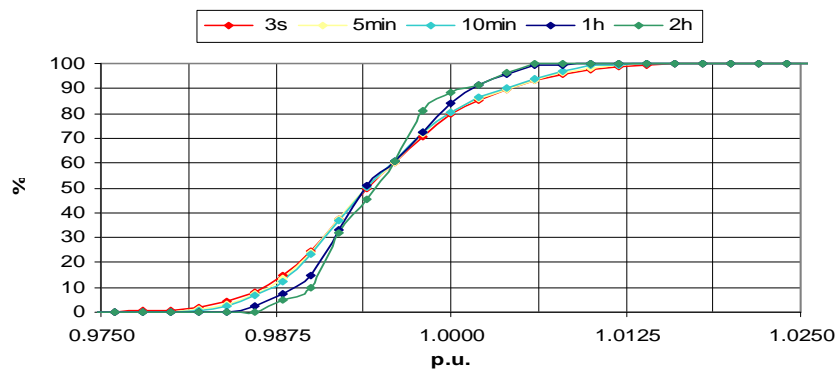


Figura 19 – Frequência acumulada de tensão na fase A N, com intervalos de leitura diversos

8. Conclusões

O desenvolvimento deste trabalho pode contribuir apresentando uma metodologia para a avaliação da qualidade da tensão em regime permanente. Apresentou algumas análises possíveis sobre os indicadores propostos, dando ênfase a avaliação estatística dos resultados das medições. Os procedimentos estatísticos, aplicados aos indicadores de tensão eficaz, sobretensão eficaz e subtensão eficaz, dão maior grau de sensibilidade sobre as avaliações realizadas numa medição. Tendo em conta os vários indicadores propostos, teremos uma melhor avaliação dos ganhos oferecidos por estes indicadores, quando forem feitos maiores números de medições, principalmente, considerando os indicadores de sobretensões e de subtensões.

Além da metodologia de análise dos indicadores propostos, o trabalho também apresentou um sistema de aquisição de sinais e tratamento de dados. Este sistema para aquisição de sinais e controle associados a softwares específicos que foram desenvolvidos, possui, como ficou demonstrado, grande flexibilidade. Esta flexibilidade oferece ao sistema um grande potencial para estudos futuros na área da qualidade de energia elétrica. O sistema de aquisição de sinais e tratamento de dados desenvolvido poderá ser utilizado para fazer diversas investigações sobre outros indicadores da qualidade de energia elétrica associados a outros fenômenos como desequilíbrio de tensão de sequência negativa, variações momentâneas de tensão, flicker, harmônicos etc. Como continuação natural deste trabalho, é possível a partir do software

desenvolvido, agregar outros indicadores. Com este objetivo, o indicador de desequilíbrio de seqüência negativa, que possui característica de regime permanente (longa duração), é o próximo indicador a ser acrescentado ao conjunto de indicadores propostos. É importante ressaltar que esta implementação é bastante simples de ser feita. Além dos fenômenos de regime permanente, o hardware desenvolvido tem oferecido bons resultados em estudos realizados com variações momentâneas de tensão. Estes estudos mais recentes, foram realizados no âmbito do Projeto de Mapeamento de Fenômenos Relativos à Qualidade do Produto no Sistema Elétrico, feito em convênio entre Eletropaulo Metropolitana e Escola Politécnica da USP.

Bibliografia:

- [1] Hydro-Québec, Caractéristiques Électriques des tensions d'Alimentacion du Réseau d'Hydro-Québec, 6/Juin/1996.
- [2] IEEE Std 1159, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, 1995.
- [3] CED - Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica, Nota Técnica - Protocolos de Medição da Tensão Eficaz, São Paulo, 1998
- [4] Hydro-Québec, CEA (Canadian Electricity Association) 220 D 711 - Power Quality Measurement Protocol CEA Guide to Performing Power Quality Surveys, Québec, 1996.
- [5] IEC 1000-4-11, Electromagnetic Compatibility - Testing and Measuring Techniques - Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variations Immunity Tests, Genève, 1994.
- [6] CED - Centro de Excelência em Distribuição de Energia, Nota Técnica - Tratamento das Flutuações de Tensão de Longa Duração Pela Portaria DNAEE/163.
- [7] LabView - Basics Course Manual, February/1996.
- [8] Pereira, Francis C e outros - Uma Proposta de Procedimento Para a Análise da Qualidade da Energia Elétrica - II SBQEE - São Lourenço - MG - 1997.
- [9] Ramos, Álvaro J P e outros - Monitoração da Qualidade de Energia Elétrica - Aspectos Práticos II SBQEE - São Lourenço - MG - 1996.
- [10] Mário Fabiano Alves - Qualidade de Energia Elétrica e o Impacto Sobre o Sistema do Consumidor - Revista Eletricidade Moderna, jun/96.
- [11] Pinheiro L.E.O. et al., "Medições para monitoração da qualidade de energia em sistemas de distribuição"/ SBQEE - Uberaba (MG), jun/96.
- [12] Assad, L.S. et al., "Regulação e fiscalização dos serviços públicos de distribuição e energia elétrica - a proposta de São Paulo", II SBQEE - São Lourenço (MG), nov/1997.
- [14] Ayello, Fernando Pettinati, "Sistema de monitoração da qualidade de energia elétrica" – Groupe Schneider – III Conladis – EPUSP – São Paulo, Setembro de 1998.
- [15] Quality of Supply Technologies "Normas NRS – 048" , desenvolvidas para a África do Sul.